RDM – Éléments finis
Manuel d'utilisation

Yves Debard

Institut Universitaire de Technologie du Mans
Département Génie Mécanique et Productique

`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/index.html`

26 juin 2006 – 29 mars 2011

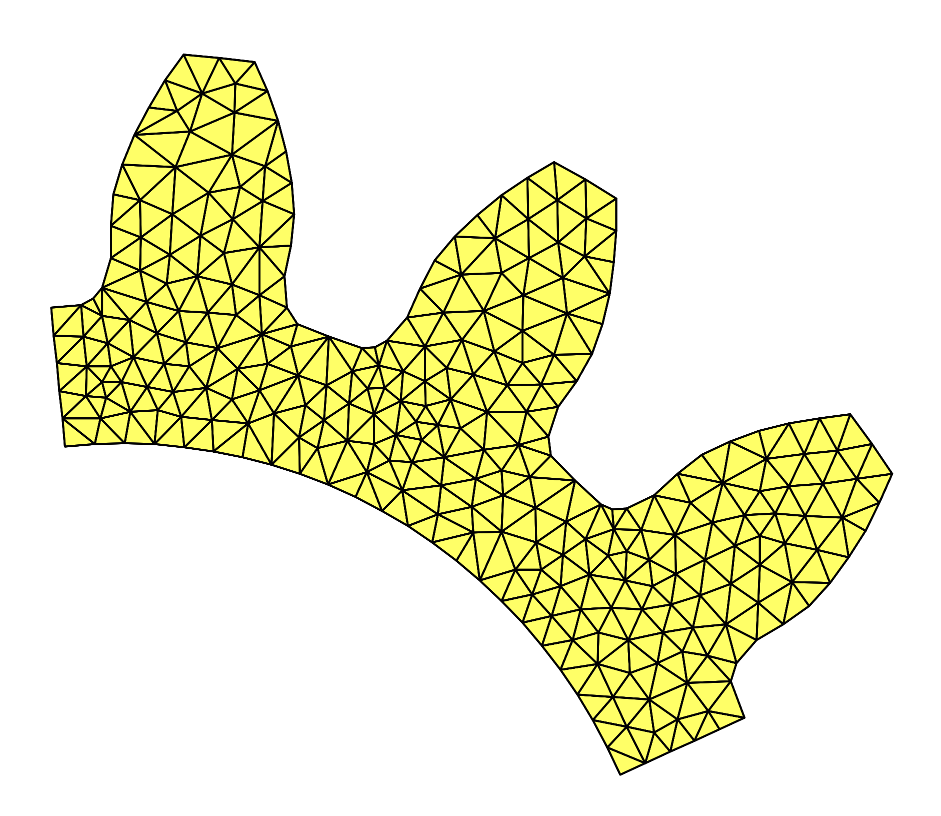




Table des matières

Présentation

L'évaluation du **comportement mécanique et/ou thermique** d'une pièce par la **méthode des éléments finis** peut être décomposée en **cinq phases** :

Modèle géométrique :

- contour extérieur
- lignes intérieures, points à mailler
- discrétisation ou maillage du domaine

...

Définition du problème :

- élasticité plane ou de révolution
- thermique plan ou de révolution
- flexion des plaques
- section droite

...

Entrées des données mécaniques et thermiques :

- matériaux, épaisseur
- conditions aux limites
- charges

...

Calculs :

- déplacements, contraintes
- actions de liaisons

...

Exploitation des résultats du calcul :

- déformée
- courbes isovaleurs, graphes
- éditions

...

RDM – Éléments finis comprend 4 modules :

Géométrie et maillage :

Ce module permet la modélisation de la géométrie de la structure, le maillage de la pièce à étudier. Deux méthodes de maillage sont proposées : maillage automatique en triangles à trois ou six noeuds, maillage par blocs étudier en triangles à trois ou six noeuds et/ou en quadrangles à 4, 8 ou 9 noeuds.

Les fichiers créés par ce module ont l'extension **.geo**.

Thermique et élasticité :

Ce module permet la détermination du comportement mécanique (statique et dynamique) et/ou thermique (dans le domaine stationnaire) de pièces planes ou de révolution.

Les sollicitations prises en compte sont :

- les charges ponctuelles et nodales.
- les charges réparties.
- le poids propre.
- les déplacements d'appuis.
- les forces d'inertie (problème de révolution).
- les charges thermiques (températures imposés, flux de chaleur, convection, ...).

Les charges thermiques peuvent être :

- des températures imposées.
- des sources de chaleur.
- des flux de chaleur imposés.
- des échanges de chaleur par convection.

Les fichiers créés par ce module ont l'extension **.cal**.

Section droite :

Ce module permet la détermination des caractéristiques d'une section droite et les contraintes sur cette section pour un effort donné.

Les fichiers créés par ce module ont l'extension **.cal**.

Flexion des plaques :

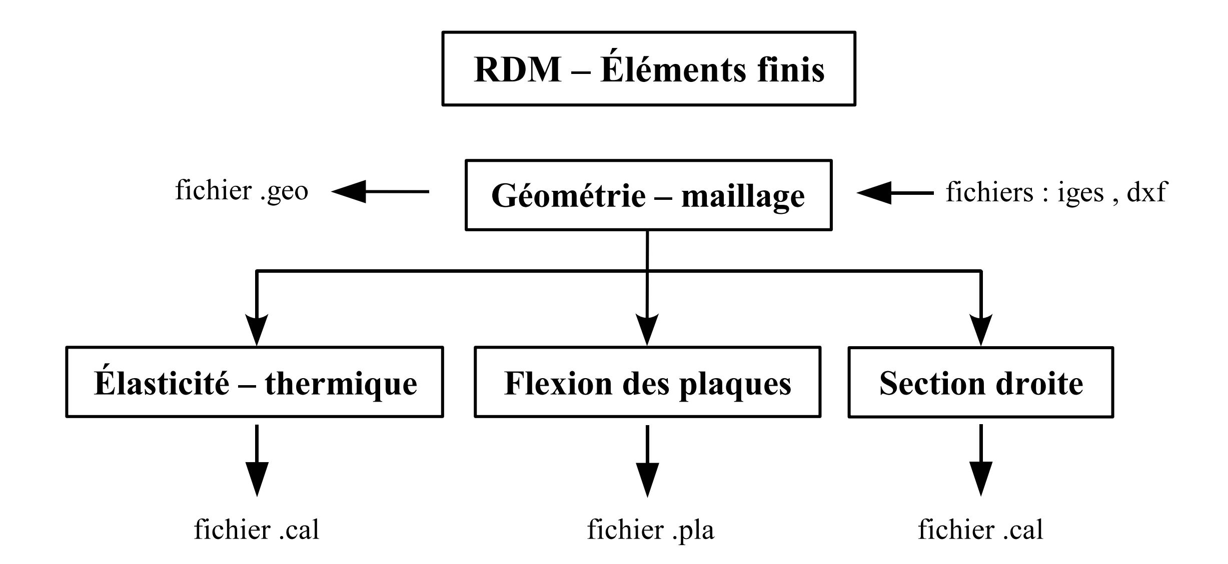
Ce module permet la détermination du comportement statique et dynamique de plaques sollicitées en flexion. Le cisaillement transverse est pris en compte.

Les sollicitations prises en compte sont :

- les charges ponctuelles et nodales.

– les charges linéiques.
– les charges surfaciques.
– le poids propre.
– les déplacements d'appuis.

Les fichiers créés par ce module ont l'extension **.pla**.



Chapitre 1

Commandes utilitaires

1.1 Modifier la configuration du logiciel

Activer la commande **Configurer RDM** du menu **Outils**.

Les principaux paramètres de l'installation sont :

- Les dimensions de l'écran **en mm** (**obligatoire**).
- Le type curseur : petit, grand.
- La couleur du fond.
- La couleur des boutons.
- Le coefficient de loupe. Ce coefficient est utilisé par les commandes **Zoom plus** et **Zoom moins**.

  ...

1.2 Ressources disponibles

Sélectionner la commande **Ressources disponibles**.

1.3 Quitter une procédure modale

Pointer dans la zone des menus, presser la touche **Echap** du clavier ou le **bouton droit de la souris**.

1.4 Consulter la dimension des tableaux

Cette commande fournit la dimension des tableaux : noeuds, liaisons, charges, ...

Sélectionner la commande **Dimension des tables**.

1.5 Afficher les attributs une entité

Cette commande permet d'afficher les attributs d'une entité : point, segment, arc, élément, charge, ...

Désigner une entité à l'aide du bouton droit de la souris.

1.6 Exporter un dessin

1. Sélectionner la commande **Exporter** du menu **Fichier**.
2. Désigner le format du fichier : **WMF** (Windows MetaFile) ou **EMF** (Enhanced MetaFile)
3. Entrer le nom du fichier sans extension.

1.7 Imprimer le dessin

1. Sélectionner la commande **Imprimer** du menu **Fichier**.
2. Entrer la dimension du dessin.

1.8 Gestion de l'écran graphique

Activer le menu **Afficher**.

1.8.1 Zoom

1. Sélectionner la commande **Zoom**.
2. Désigner les deux extrémités de l'une des diagonales de la nouvelle fenêtre de travail.

1.8.2 Zoom plus/moins

Sélectionner la commande **Zoom plus** ou **Zoom moins**.

Cette commande permet de diminuer/agrandir la partie du dessin visible dans la fenêtre. Le facteur d'échelle utilisé est le coefficient de loupe (§ Configurer RDM).

1.8.3 Centrer la fenêtre de travail sur un point

1. Sélectionner la commande **Centrer**.
2. Désigner le centre de la nouvelle fenêtre de travail.

1.8.4 Afficher tout le dessin

Sélectionner la commande **Échelle maximale**.

1.8.5 Réafficher le dessin

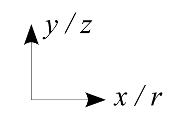
Sélectionner la commande **Mise au net**.

Chapitre 2

Géométrie

Le module **Géométrie** est un logiciel de dessin 2D qui permet la modélisation des structures planes en vue de leur calcul par la méthode des éléments finis. Ce module prend en compte les contraintes du maillage. En particulier, un point (point isolé ou extrémité d'une courbe), est lors de sa création attaché aux entités existantes (point ou courbe). Ce mode de fonctionnement est prioritaire sur le calage.

Remarque : les coordonnées des points sont définies dans le repère $\{xy\}$ pour un problème plan et le repère $\{rz\}$ pour un problème de. L'axe x/r est horizontal et dirigé de la gauche vers la droite ; l'axe y/z est vertical et dirigé de bas en haut. Si le problème est de révolution, l'axe de symétrie est l'axe z.

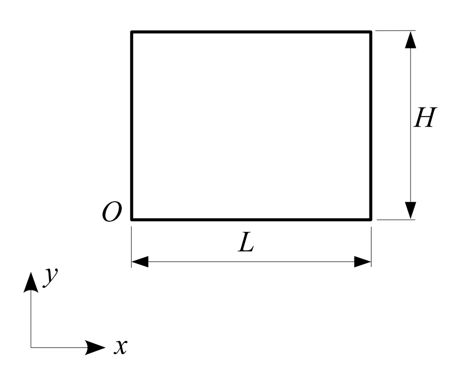


2.1 Menu principal

2.1.1 Commencer une nouvelle étude

1. Sélectionner la commande **Nouvelle étude** du menu **Fichier**.
2. Définir le cadre de travail :

   Le cadre de travail est la fenêtre de référence. Il est défini par les coordonnées du point O, sa longueur L et sa hauteur H.

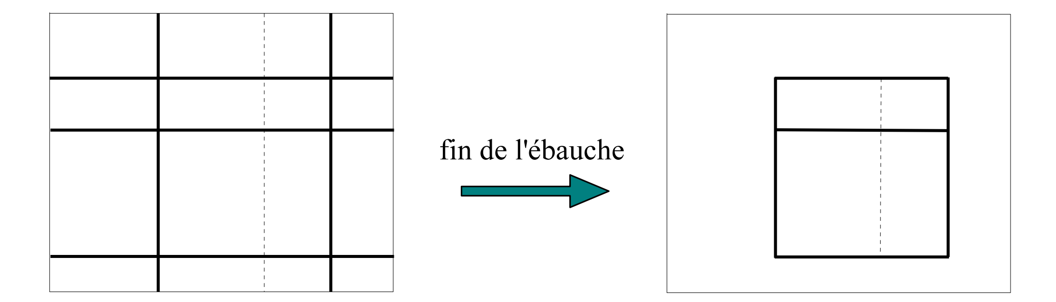


Les limites du cadre de travail peuvent êtres modifiées au cours de la modélisation : sélectionner la commande **Modifier le cadre de travail** du menu **Modéliser**.

On revient à cette fenêtre de travail en pointant la case menu **Échelle maximale** du menu **Afficher**.

3. Indiquer si le dessin doit commencer par une ébauche :

   L'ébauche permet la création de droites verticales et horizontales qui serviront de support aux constructions ultérieures (segments, arcs, raccordements, . . .). Cette phase de travail se termine en pointant la case menu **Fin ébauche**. Le programme calcule alors les coordonnées des points d'intersection des droites. Ces points permettent la discrétisation des droites en segments. Seuls sont conservés les segments dont les deux extrémités sont situés dans le cadre de travail.



2.1.2 Rappeler un dessin paramétré

1. Sélectionner la commande **Bibliothèque** du menu **Fichier**.
2. Entrer le numéro du dessin paramétré.
3. Entrer les paramètres du dessin.

2.1.3 Rappeler un dessin sauvegardé sur le disque

1. Sélectionner la commande **Ouvrir** du menu **Fichier**.
2. Entrer le nom du fichier.

2.1.4 Enregistrer les données

1. Sélectionner la commande **Enregistrer** du menu **Fichier**.
2. Entrer le nom du fichier.

Le dessin est sauvegardé dans un fichier dont l'extension est **.geo**.

Remarque : par défaut, le programme effectue une sauvegarde dans le fichier **$$$.geo**.

2.1.5 Importer un dessin

Cette commande permet d'importer un dessin généré avec un autre logiciel :

Format IGES [1] : le fichier doit avoir l'extension **.igs**.

1. Sélectionner la commande **.igs** ou **.igs (UNIX)** du menu **Importer**.
2. Entrer le nom du fichier (sans extension).
3. Entrer le nom de l'unité utilisée pour créer le dessin (mètre/millimètre).
4. Entrer la précision avec laquelle seront effectués les calculs (construction des tableaux) lors du transfert des données.

1. IGES : Initial Graphics Exchange Specification.

2.1.6 Mailler la structure (maillage automatique)

Activer le menu **Mailler (Delaunay)**.

2.1.7 Mailler la structure (maillage par blocs)

Activer le menu **Mailler par blocs**.

Remarque : si le menu **Mailler par blocs** est caché, activer la commande **Options** du menu **Outils**.

2.1.8 Caractéristiques d'une surface

Sélectionner la commande **Surface**.

Cette commande permet le calcul des caractéristiques géométriques d'une surface :

- Périmètre, aire, position du centre de gravité.
- Moments quadratiques par rapport aux axes x et y.
- Moments quadratiques centraux principaux.

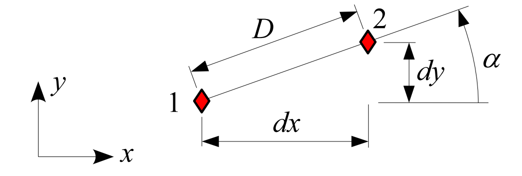
...

2.2 Outils

2.2.1 Afficher les points

Sélectionner la commande **Points** du menu **Afficher**.

2.2.2 Mesurer



1. Sélectionner la commande **Mesurer** du menu **Modéliser**.
2. Désigner deux points 1 et 2.

Cette fonction donne :

- la distance D entre les points.
- la différence des abscisses dx.
- la différence des ordonnées dy.
- l'angle α du vecteur $1 \to 2$ avec l'axe x.

2.2.3 Inventaire de la base de données

Sélectionner la commande **Inventaire** du menu **Modéliser**.

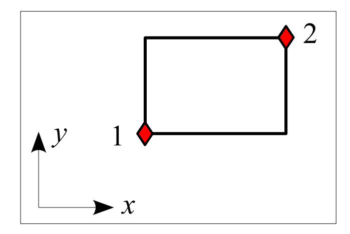
La fonction fournit le nombre de points, segments, ...

2.2.4 Activer ou désactiver le calage

Sélectionner la commande **Calage** du menu **Modéliser**.

Lorsque le calage est actif, un segment ou un arc est calé horizontalement (verticalement) si la droite qui passe par les points extrémités est horizontale (verticale) à 15 degrés près.

2.2.5 Modifier le cadre de travail



1. Sélectionner la commande **Modifier le cadre de travail** du menu **Modéliser**.
2. Désigner les extrémités 1 et 2 de l'une des deux diagonales du nouveau cadre de travail.

2.2.6 Modifier le trait courant

1. Sélectionner la commande **Modifier le trait courant** du menu **Modéliser**.
2. Désigner une couleur dans la palette de couleurs.
3. Désigner un type de trait : plein, pointillé, mixte, plein fort.

2.2.7 Attribuer le trait courant à une entité

1. Sélectionner la commande **Attribuer le trait courant à une entité** du menu **Modéliser**.
2. Désigner une entité.

2.2.8 Compacter les données

Sélectionner la commande **Compacter les données** du menu **Modéliser**.

Cette fonction permet le nettoyage des données :

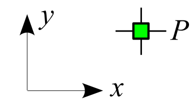
- Les points isolés et les entités dupliquées sont éliminés.
- Un point proche d'une ligne est projeté sur celle-ci. La ligne est coupée en 2.
- Les lignes de longueur nulle sont éliminées.

...

2.3 Points

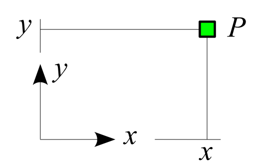
Activer le menu **Points** du menu **Modéliser**.

2.3.1 Créer un point par numérisation



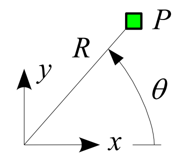
Pointer dans la zone graphique.

2.3.2 Créer un point par ses coordonnées cartésiennes



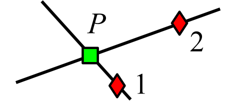
Entrer les coordonnées x et y du point.

2.3.3 Créer un point par ses coordonnées polaires



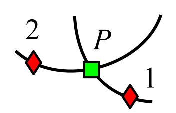
1. Entrer la coordonnée radiale R du point.
2. Entrer la position angulaire α du point.

2.3.4 Intersection de deux segments



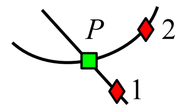
Désigner deux segments 1 et 2.

2.3.5 Intersection de deux arcs



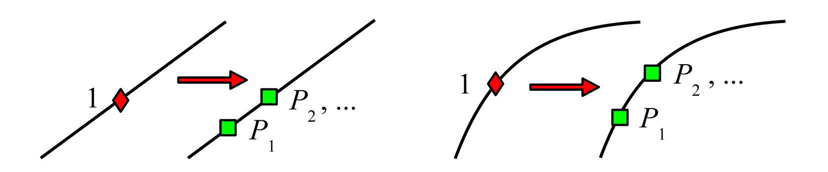
Désigner deux arcs 1 et 2.

2.3.6 Intersection d'un segment et d'un arc



1. Désigner un segment ou une droite 1.
2. Désigner un arc ou un cercle 2.

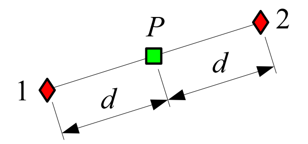
2.3.7 Discrétiser un segment ou un arc



Cette commande permet de remplacer un segment (arc) par plusieurs segments (arcs) de même longueur.

1. Désigner l'entité à discrétiser.
2. Entrer le nombre d'entités à créer.

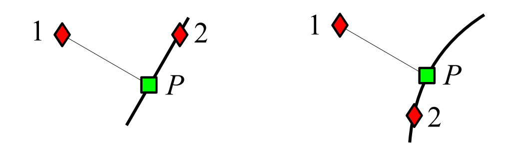
2.3.8 Point milieu



Cette commande permet la création du point P situé au milieu de deux points donnés 1 et 2.

1. Désigner un point 1.
2. Désigner un point 2.

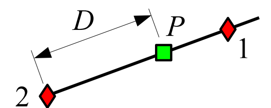
2.3.9 Projeter un point sur un segment ou un arc



1. Désigner un point 1.
2. Désigner une courbe 2.

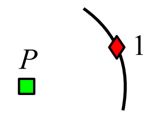
Le point P, projection du point 1 sur le support de la courbe 2 est créé.

2.3.10 Point sur segment



1. Désigner un segment 1.
2. Désigner l'extrémité de référence 2.
3. Entrer la distance D du point à créer au point de référence.

2.3.11 Point centre d'un arc ou d'un cercle



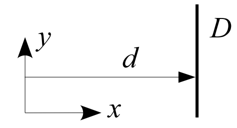
Désigner un arc 1.

Le point P situé au centre de l'arc est créé.

2.4 Droites

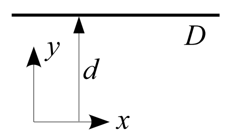
Activer le menu **Droites** du menu **Modéliser**.

2.4.1 Droite verticale



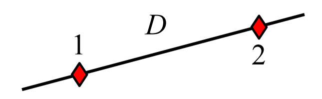
Entrez l'abscisse d de la droite.

2.4.2 Droite horizontale



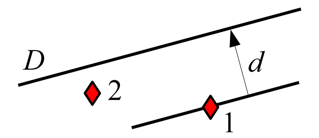
Entrer l'ordonnée d de la droite.

2.4.3 Droite passant par deux points



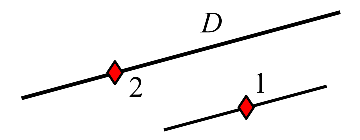
Désigner deux points 1 et 2.

2.4.4 Droite parallèle à un segment



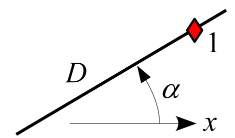
1. Désigner le segment/droite de référence 1.
2. Désigner un point 2 du demi-plan, limité par 1, qui contient la droite.
3. Entrer la distance d de la droite à l'entité de référence.

2.4.5 Droite parallèle à un segment et passant par un point



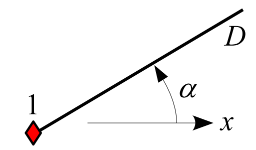
1. Désigner le segment de référence 1.
2. Désigner un point 2 de la droite.

2.4.6 Droite définie par un point et par son inclinaison



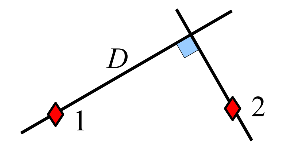
1. Désigner un point 1 de la droite.
2. Entrer l'inclinaison α de la droite avec l'horizontale.

2.4.7 Demi-droite



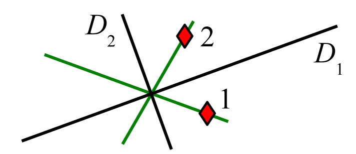
1. Désigner l'origine 1 de la demi-droite.
2. Entrer l'angle α de la demi-droite avec l'horizontale.

2.4.8 Droite passant par un point et perpendiculaire à un segment



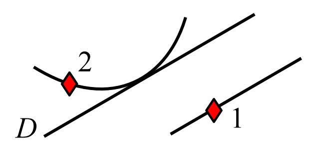
1. Désigner un point 1 de la droite à créer.
2. Désigner le segment de référence 2.

2.4.9 Bissectrices de deux segments



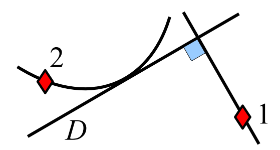
Désigner deux segments 1 et 2.

2.4.10 Droite tangente à un arc et parallèle à un segment



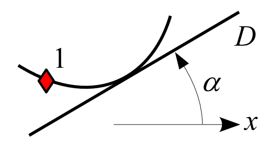
1. Désigner un segment 1.
2. Désigner un arc 2.

2.4.11 Droite tangente à un arc et perpendiculaire à un segment



1. Désigner un segment 1.
2. Désigner un arc 2. La position de ce pointer définit la position du point de tangence.

2.4.12 Droite tangente à un arc et de direction donnée

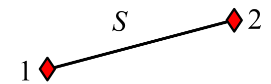


1. Désigner un arc 1. La position de ce pointer définit la position du point de tangence.
2. Entrer l'inclinaison α de la droite par rapport à l'axe x.

2.5 Segments

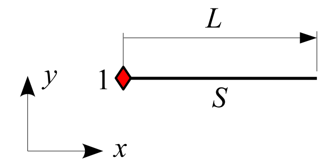
Activer le menu **Segments** du menu **Modéliser**.

2.5.1 Segment défini par deux points



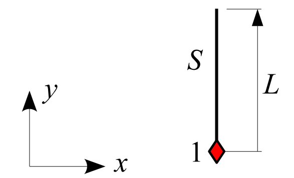
Désigner les deux extrémités 1 et 2 du segment.

2.5.2 Segment horizontal



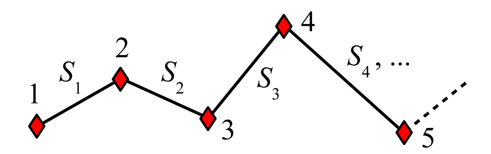
1. Désigner l'origine 1 du segment.
2. Entrer la longueur du segment L.

2.5.3 Segment vertical



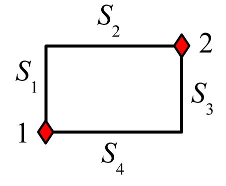
1. Désigner l'origine 1 du segment.
2. Entrer la longueur du segment L.

2.5.4 Polyligne



1. Désigner les sommets de la polyligne.
2. Terminer en pointant dans la zone des menus.

2.5.5 Rectangle

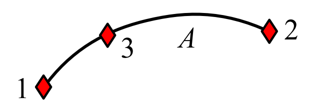


Désigner les deux extrémités 1 et 2 de l'une des diagonales du rectangle.

2.6 Arcs

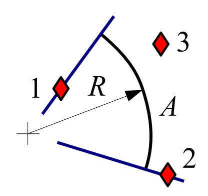
Activer le menu **Arcs** du menu **Modéliser**.

2.6.1 Arc défini par trois points



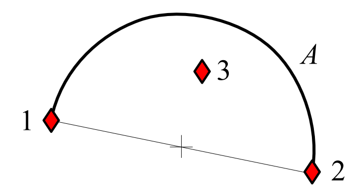
1. Désigner les deux extrémités 1 et 2 de l'arc.
2. Désigner un point 3 de l'arc.

2.6.2 Arc défini par deux segments et par son rayon



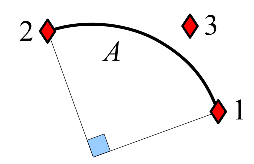
1. Désigner les deux segments 1 et 2 qui limitent l'arc.
2. Désigner un point 3 du quadrant, limité par les deux segments, qui contient l'arc.
3. Entrer le rayon de l'arc R.

2.6.3 Demi-cercle



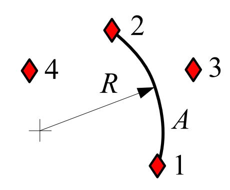
1. Désigner les deux extrémités 1 et 2 de l'arc.
2. Désigner un point 3 du demi-plan, limité par la droite $1 - 2$, qui contient l'arc.

2.6.4 Quart de cercle



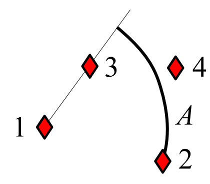
1. Désigner les deux extrémités 1 et 2 de l'arc.
2. Désigner un point 3 du demi-plan, limité par la droite $1 - 2$, qui contient l'arc.

2.6.5 Arc défini par ses deux extrémités et son rayon



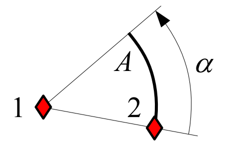
1. Désigner les deux extrémités 1 et 2 de l'arc.
2. Désigner un point 3 du demi-plan, limité par la droite $1-2$, qui contient l"arc.
3. Désigner un point 4 du demi-plan, limité par la droite $1-2$, qui contient le centre de l'arc.
4. Entrer le rayon de l'arc R.

2.6.6 Arc défini par son centre, son origine et un point



1. Désigner le centre de l'arc 1.
2. Désigner l'origine de l'arc 2.
3. Désigner un point 3 tel que l'extrémité de l'arc se trouve sur la demi-droite qui a pour origine le centre de l'arc et qui passe par le point 3.
4. Désigner un point 4 proche de l'arc.

2.6.7 Arc défini par son centre, son origine et son angle d'ouverture

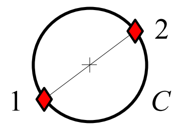


1. Désigner le centre 1 de l'arc.
2. Désigner l'origine 2 de l'arc.
3. Entrer l'angle d'ouverture α de l'arc.

2.7 Cercles

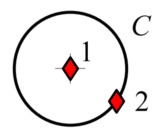
Activer le menu **Cercles** du menu **Modéliser**.

2.7.1 Cercle défini par deux points diamètralement opposés



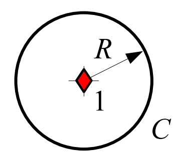
Désigner deux points diamètralement opposés 1 et 2 du cercle.

2.7.2 Cercle défini par son centre et un point



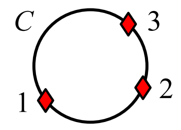
1. Désigner le centre 1 du cercle.
2. Désigner un point 2 du cercle.

2.7.3 Cercle défini par son centre et son rayon



1. Désigner le centre 1 du cercle.
2. Entrer le rayon du cercle R.

2.7.4 Cercle défini par trois points



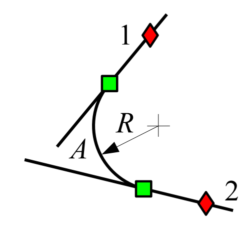
Désigner trois points non alignés.

2.8 Raccordements

Pour toutes les procédures suivantes, la position du pointer, lors de la désignation des entités à raccorder, définit la position des points de tangence.

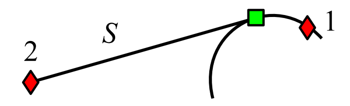
Activer le menu **Raccordements** du menu **Modéliser**.

2.8.1 Arc tangent à deux segments



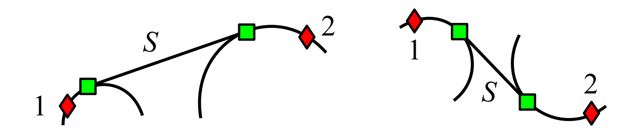
1. Désigner deux segments 1 et 2.
2. Entrer le rayon de l'arc.

2.8.2 Segment partant d'un point et tangent à un arc



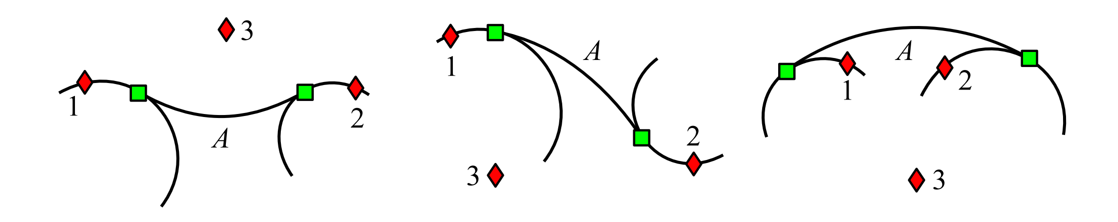
1. Désigner un arc 1.
2. Désigner un point 2.

2.8.3 Segment tangent à deux arcs



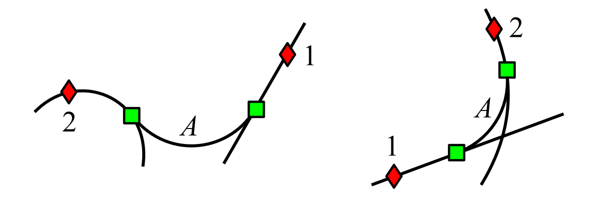
Désigner deux arcs 1 et 2.

2.8.4 Arc tangent à deux arcs



1. Désigner deux arcs 1 et 2.
2. Désigner le centre de l'arc 3.
3. Entrer le rayon de l'arc de raccordement.

2.8.5 Arc tangent à un arc et à un segment



1. Désigner un segment 1.
2. Désigner un arc 2.
3. Entrer le rayon de l'arc de raccordement.

2.9 Transformations géométriques

Les transformations géométriques permettent de déplacer ou copier une entité ou les entités contenues dans une fenêtre.

Sélectionner la commande **Transformer** du menu **Modéliser**.

2.9.1 Translation

Vecteur translation défini par deux points

1. Désigner l'origine du vecteur translation.
2. Désigner l'extrémité du vecteur translation.

Vecteur translation défini par composantes

Entrer les composantes du vecteur du vecteur translation.

Translation horizontale

Entrer la composante horizontale du vecteur translation.

Translation verticale

Entrer la composante verticale du vecteur translation.

2.9.2 Rotation

Axe de rotation défini par un point

1. Désigner un point.
2. Entrer l'angle de rotation.

Axe de rotation défini par ses coordonnées

1. Entrer les coordonnées de l'axe de la rotation.
2. Entrer l' angle de la rotation.

2.9.3 Symétrie par rapport à une droite

Axe de symétrie défini par deux points

Désigner les deux points.

Axe de symétrie vertical

Désigner un point.

Axe de symétrie horizontal

Désigner un point.

2.10 Bibliothèque de structures planes

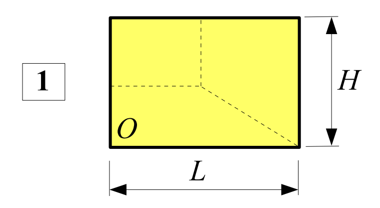
Remarque : l'axe x est horizontal et dirigé de la gauche vers la droite ; l'axe y est vertical et dirigé du bas vers le haut.

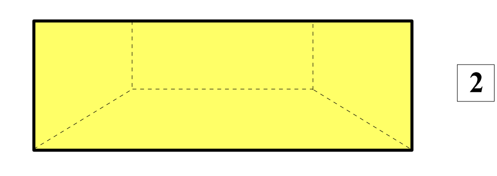
Mode opératoire :

1. Sélectionner la commande **Bibliothèque** du menu **Fichier**.
2. Entrer les dimensions de la structure.

Structures 1 et 2

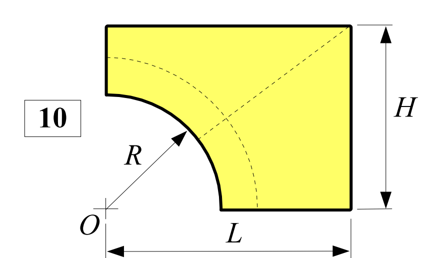
Paramètres : coordonnées du point O, L, H.

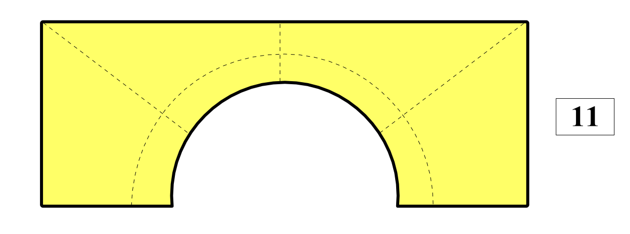


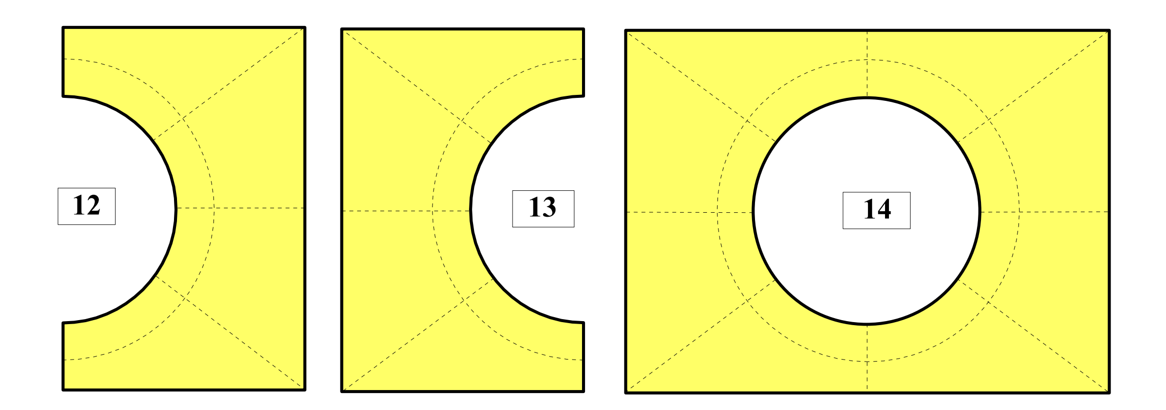


Structures 10, 11, 12, 13 et 14

Paramètres : coordonnées du point O , L , H , R.

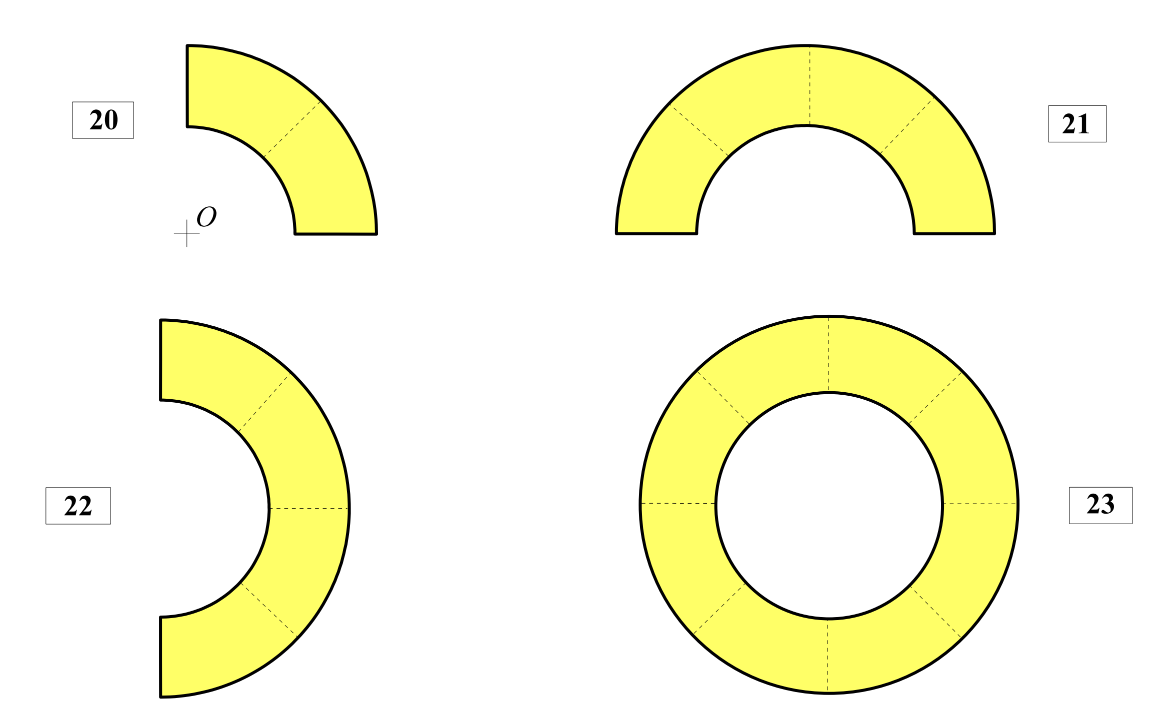






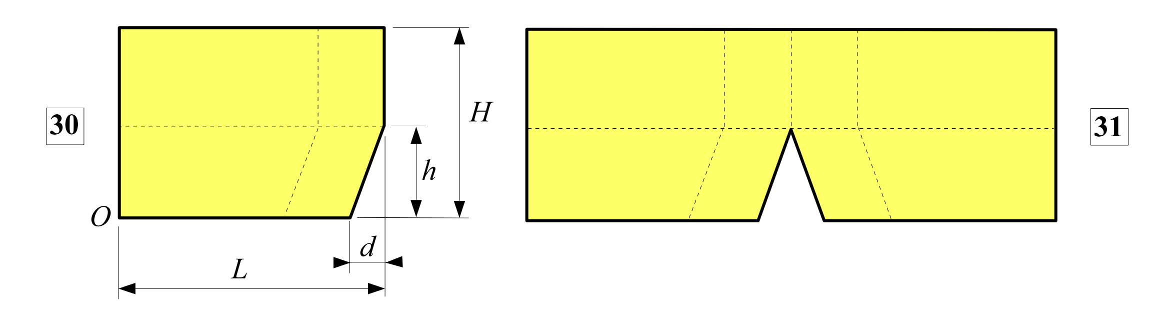
Structures 20, 21, 22 et 23

Paramètres : coordonnées du point O, rayons intérieur et extérieur.



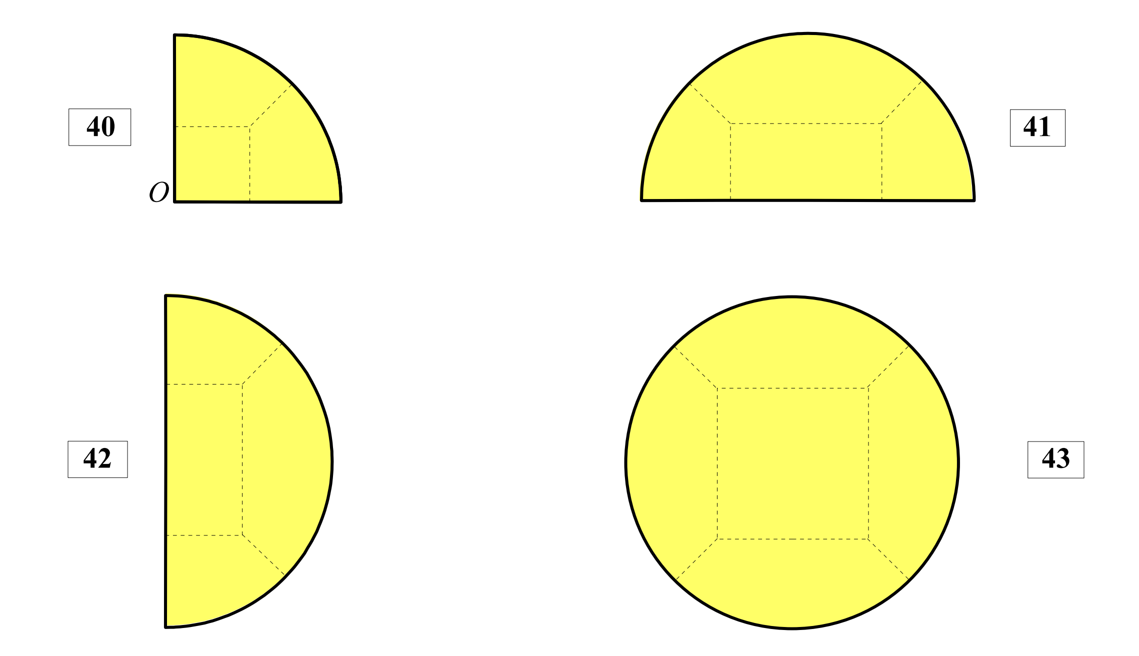
Structures 30, 31 (pièces avec entaille)

Paramètres : L , H , d , h.



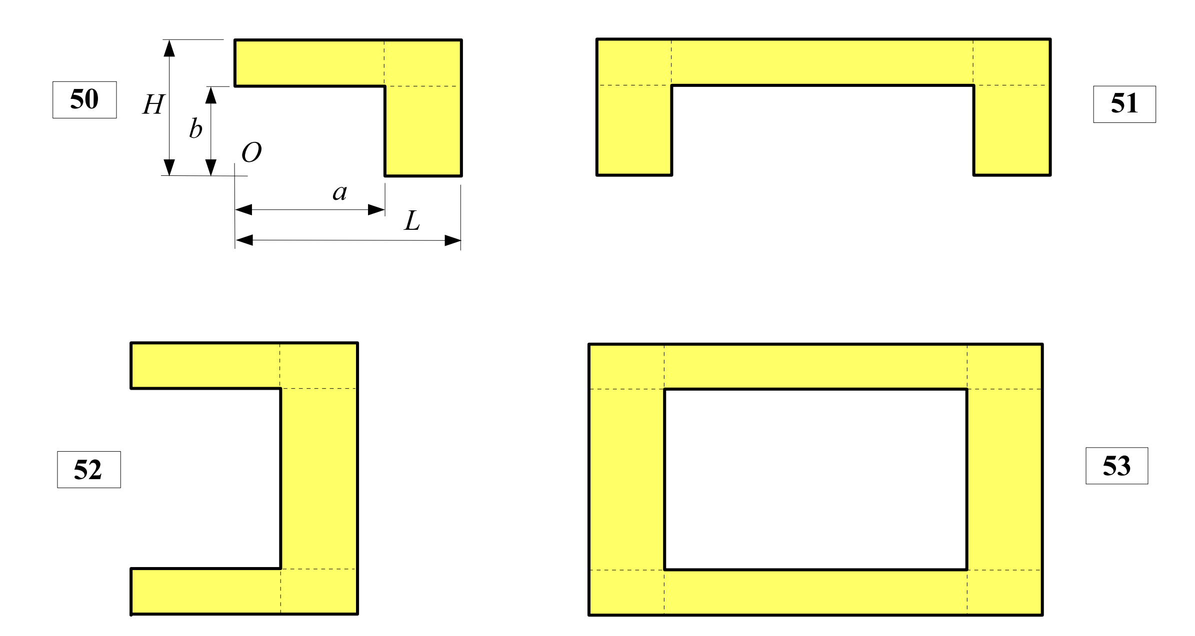
Structures 40, 41, 42 et 43

Paramètres : coordonnées du point O et rayon de l'arc.



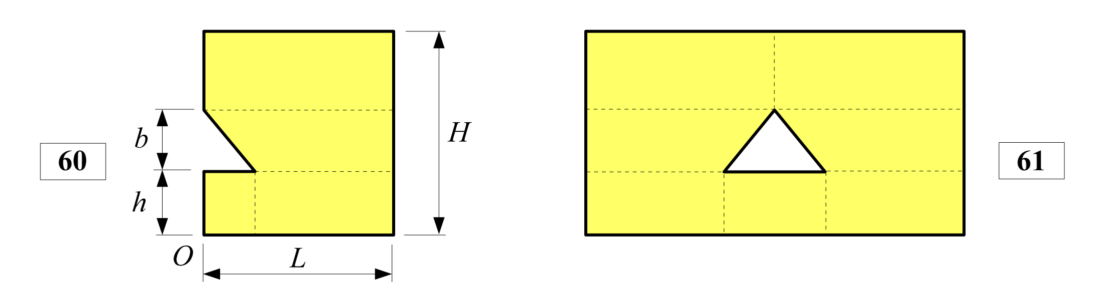
Structures 50, 51, 52 et 53

Paramètres : coordonnées du point O , L , H , a et b.



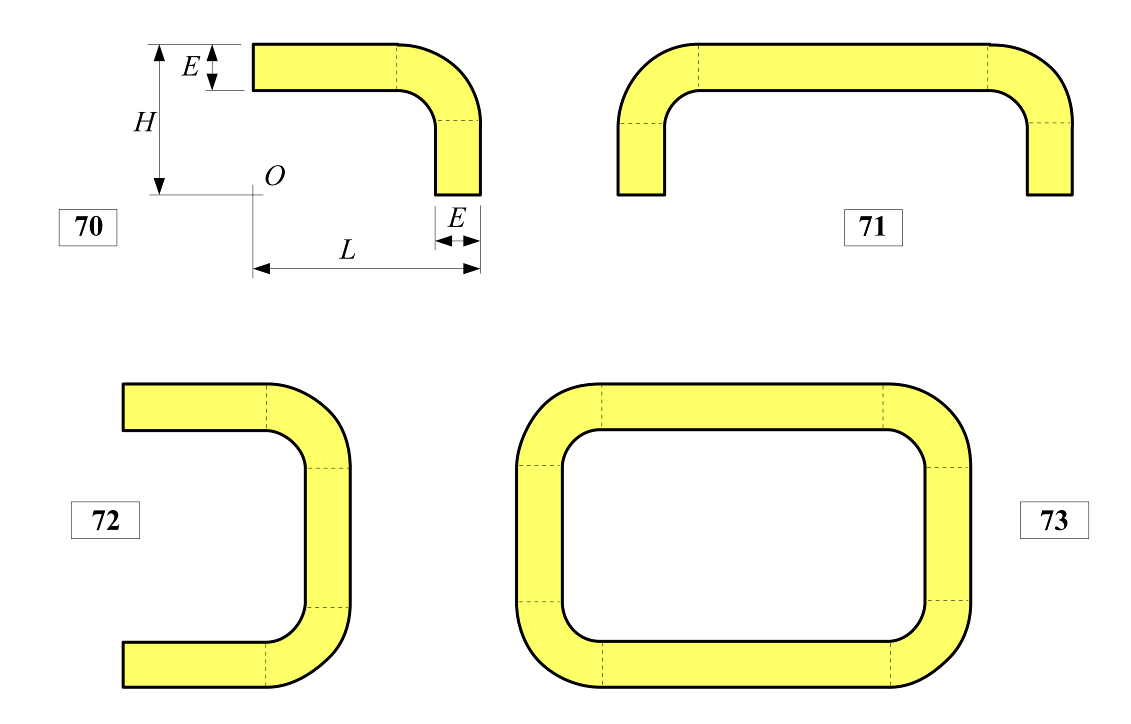
Structures 60 et 61

Paramètres : L , H , a , b et h.



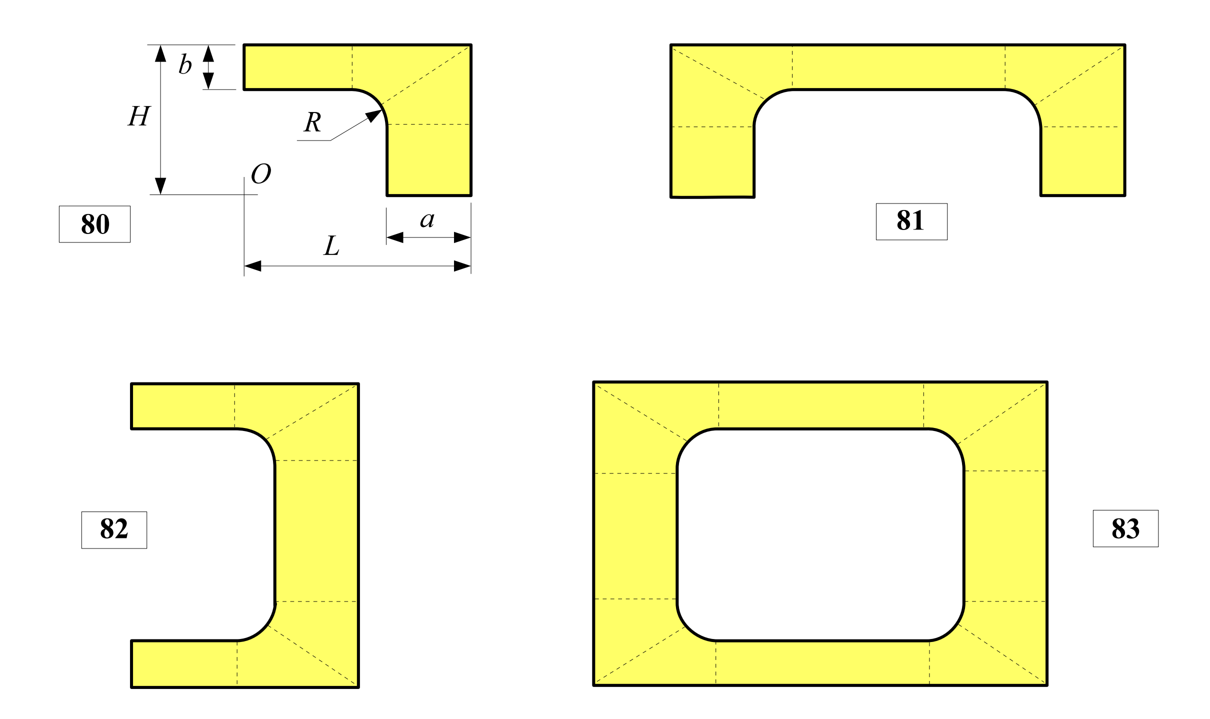
Structures 70, 71, 72 et 73

Paramètres : coordonnées du point O , L , H , E et R.



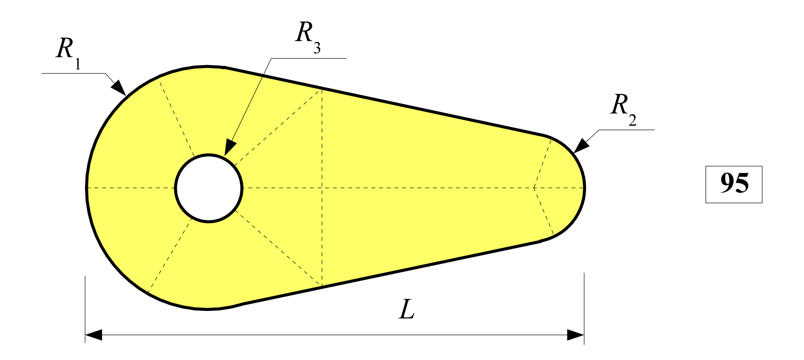
Structures 80, 81, 82 et 83

Paramètres : coordonnées du point O , L , H , a , b et R.



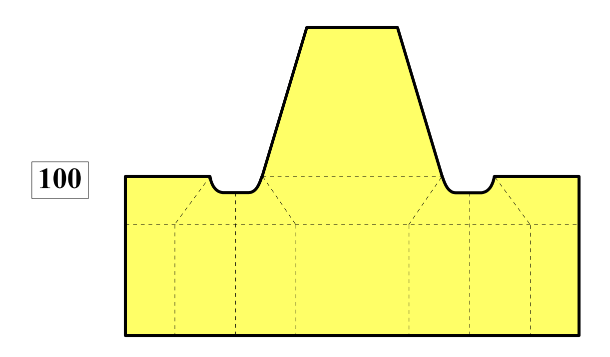
Structure 95 : came

Paramètres : longueur de la came L , R_1 , R_2 et R_3.



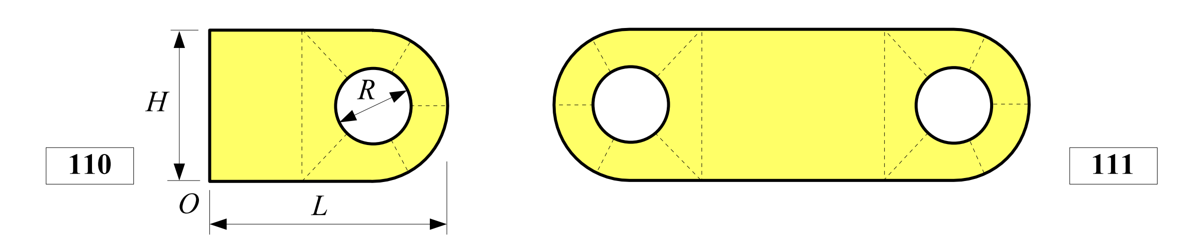
Structure 100 : dent de crémaillère

Paramètre : module de la dent.



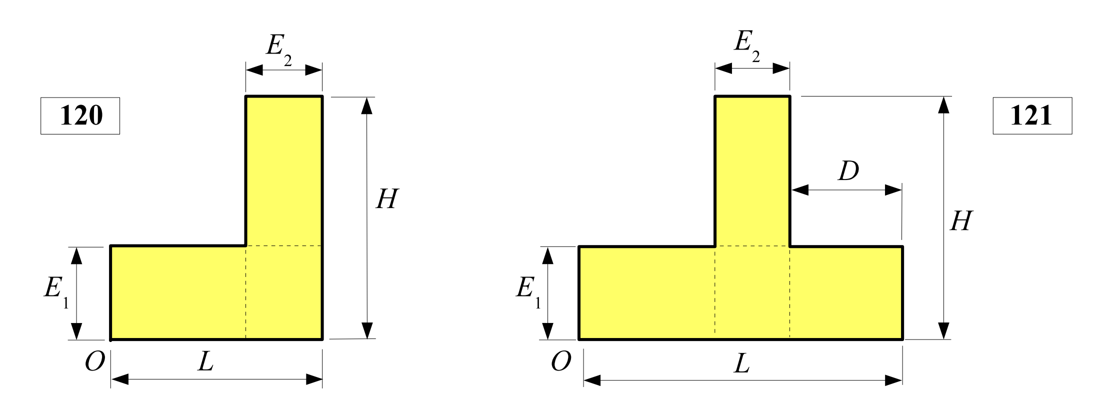
Structures 110 et 111

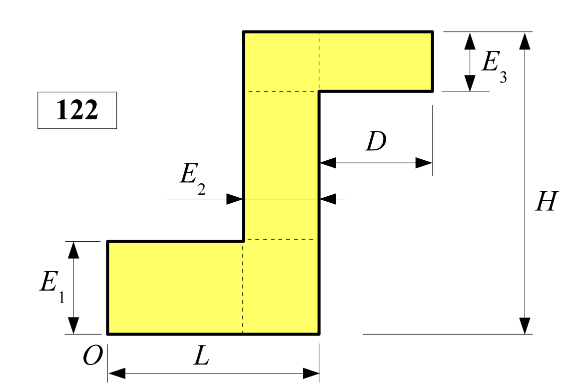
Paramètres : L , H et R.

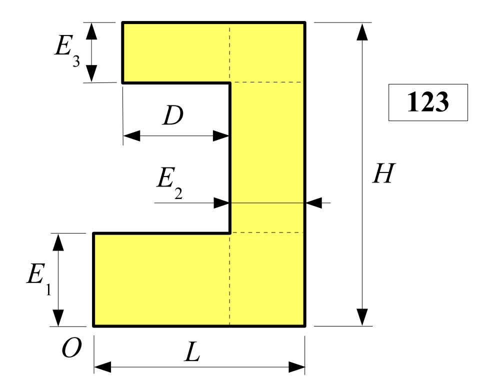


Structures 120, 121, 122 et 123

Paramètres : coordonnées du point O , L , H , D , E_1 ,E_2 et E_3.




122
E3
D
E2
H
E1
O
L


E3
123
D
E2
H
E1
O
L

Chapitre 3

Maillage automatique

Le mailleur automatique permet la discrétisation d'un domaine plan en triangles à 3 ou 6 nœuds à bords droits ou curvilignes. La méthode utilisée est la **triangulation de Delaunay**.

Les étapes de la modélisation sont :

1. Modélisation de la géométrie : contour extérieur de la pièce, lignes intérieures, nœuds imposés (points à mailler), ...

2. Choix des paramètres du maillage : nombre d'éléments à générer, ...

3. Choix du type d'élément et maillage du domaine par triangulation de Delaunay.

Ces opérations sont effectuées avec le module **Dessin et maillage**.

3.1 Modélisation de la géométrie

Le contour extérieur de la pièce doit être :

– fermé,
– en trait continu,
– formé de segments, d'arcs et de cercles.

Exemples : C_1 , C_2

La géométrie peut également comporter des lignes intérieures (en trait pointillé). Ces lignes serviront éventuellement de support à des charges, des liaisons... Certaines de ces lignes peuvent former des sous-domaines et permettront d'introduire des changements de matériau, d'épaisseur, ...

Exemples : LM , SD

On peut de plus marquer des points (Commande **Points à Mailler** du menu **Modéliser**) : ces points seront des nœuds du maillage. Ils peuvent se trouver sur le contour ou à l'intérieur du domaine. Ces points serviront éventuellement de support à des entités : charges, liaisons, ...

Exemples : PM_1 , PM_2

Remarque 1 : les points anguleux (tolérance 15°) seront des nœuds du maillage.

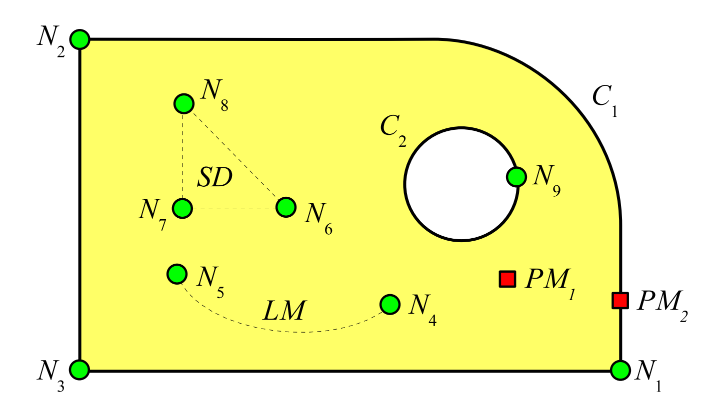
Exemples : N_1 , N_2 , ...

Remarque 2 : un cercle contient un point qui sera un nœud.

Exemple : N_9

Remarque 3 : l'ensemble des courbes comprises entre deux nœuds est appelée '« ligne frontière ».

Exemples : $(N_3\ N_1)$, $(N_1\ PM_2\ )$, $(N_4\ N_5)$, ...



3.2 Triangulation de Delaunay

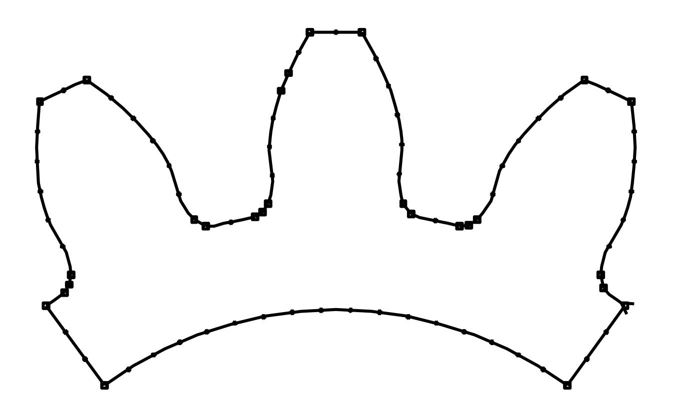
Références :

[5, 7, 3, 6, 4]
`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/maillage.pdf`

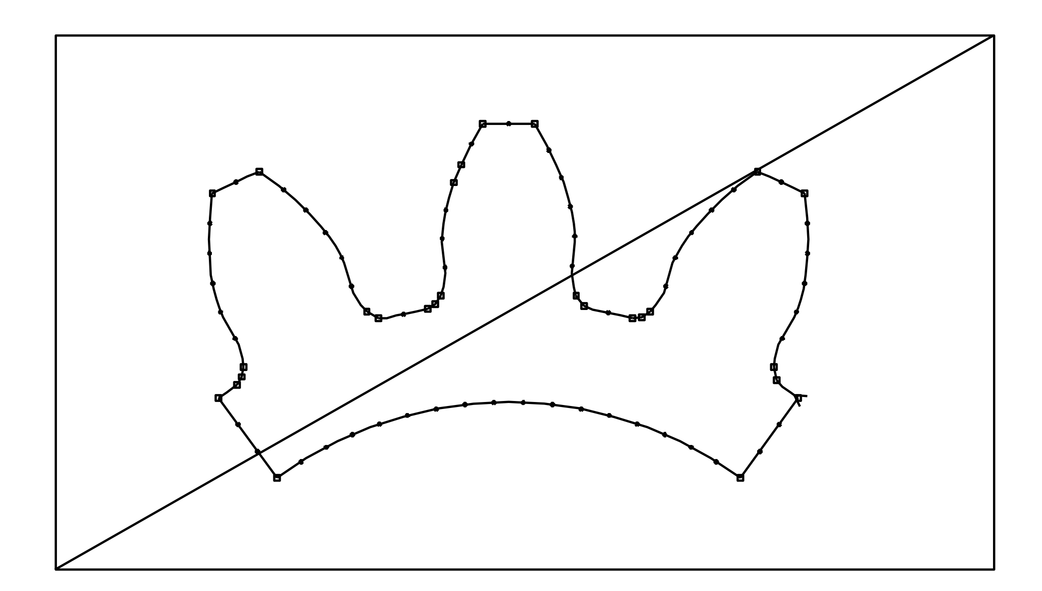
La méthode de Delaunay permet la triangulation d'un domaine plan à partir du maillage de sa frontière en segments. La mise en œuvre de cette méthode comprend les phases suivantes :

1. **Discrétisation de la frontière**

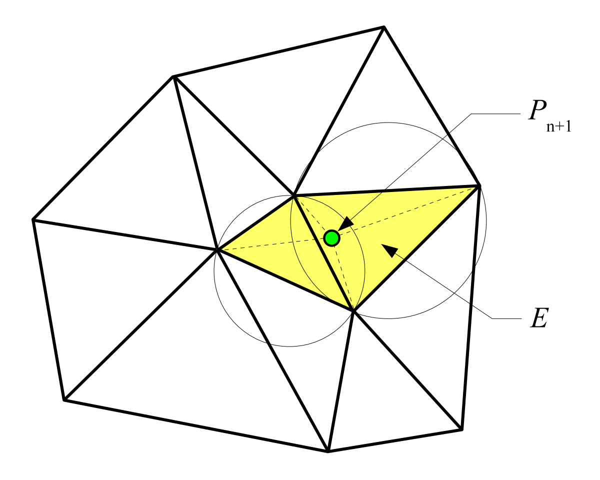
   La frontière et éventuellement les lignes intérieures sont discrétisées en segments.



2. **Création de 4 points supplémentaires** qui définissent un quadrilatère englobant le domaine à mailler. La discrétisation de cette boîte en deux triangles constitue le maillage de départ.



3. **Triangulation de la boîte** par insertion, un à un, des points générés lors de phase 1 et éventuellement de points supplémentaires imposés : points à mailler, lignes intérieures, ...



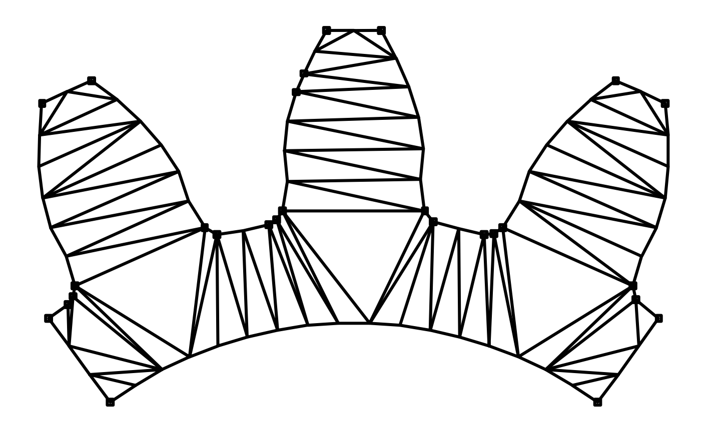
On procède de la manière suivante :

Soit T_n la triangulation construite avec les n premiers points et P_{n+1} le point à insérer dans le maillage. D'après la phase 2, ce point est interne à T_n. Soit E l'ensemble des triangles de T_n dont le cercle circonscrit contient P_{n+1}. La construction de la triangulation T_{n+1} consiste à :

(a) détruire les triangles contenus dans E.

(b) remailler le sous-domaine défini par E en joignant P_{n+1} aux arêtes externes de E.

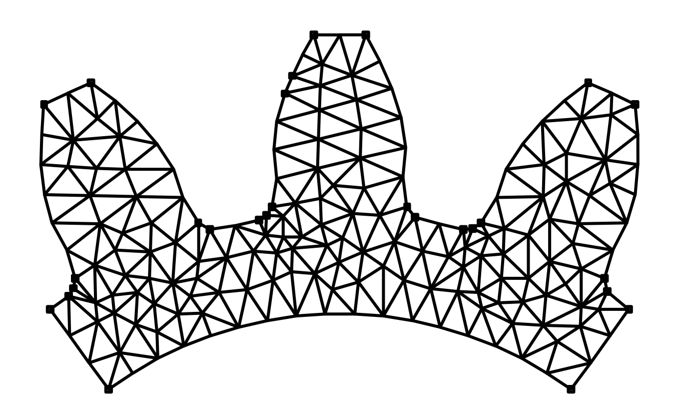
4. **Elimination des triangles extérieurs au domaine**.



5. **Création des nœuds intérieurs au domaine**.

   Le maillage précédent est en général impropre au calcul : il doit être raffiné. Une première série de points est crée dans les triangles dont l'aire est plus grande qu'une certaine valeur. Ce processus est répété plusieurs fois. La méthode utilisée est celle décrite ci-dessus. La taille des éléments générés dépend :

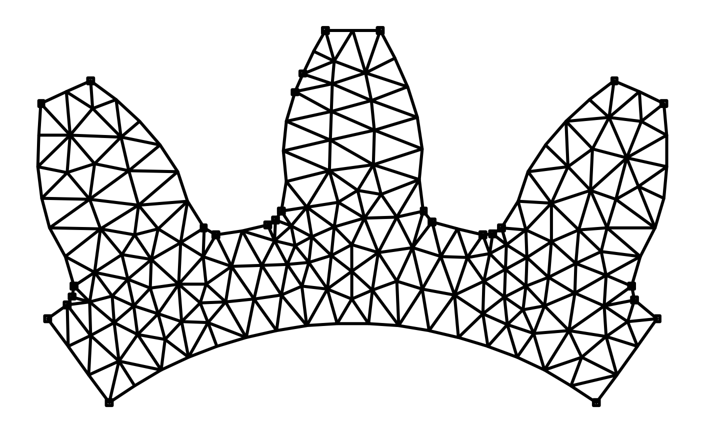
   – de la discrétisation de la frontière.
   – de la densité d'éléments autour des points à mailler.
   ...



6. **Amélioration du maillage**.

   Le maillage obtenu est souvent de qualité médiocre. Il est amélioré par :

   – lissage barycentrique : chaque nœud non situé sur la frontière est déplacé au centre de gravité des nœuds qui lui sont connectés. Cette opération peut être répétée plusieurs fois (voir **paramètres du maillage**).
   – suppression d'arêtes.
   – retournement d'arêtes.
   ...



3.3 Commandes disponibles

3.3.1 Paramètres du maillage

1. Sélectionner la commande **Paramètres** du menu **Modéliser**.
2. Entrer les paramètres :

   – Nombre approximatif d'éléments à générer.
   – Nombre d'itérations lors de la phase d'amélioration du maillage.
   – Valeur minimale acceptable pour la qualité du jacobien (valeur conseillée 0.7).

Les paramètres du maillage sont enregistrés dans le fichier **rdmdat.ini** situé dans le répertoire **temp** qui contient les fichiers temporaires.

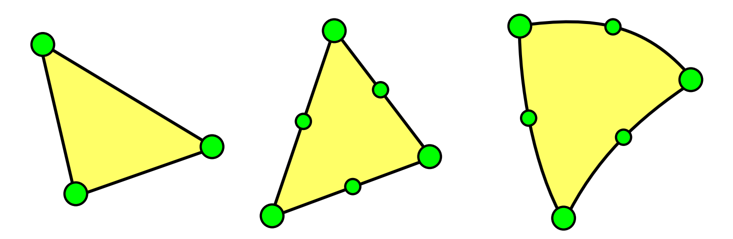
3.3.2 Modifier la taille des éléments autour d'un nœud

Cette commande permet de densifier le maillage autour d'un nœud.

1. Sélectionner la commande **Modifier la taille des éléments** du menu **Modéliser**.
2. Entrer le coefficient.
3. Désigner un point à mailler.

3.3.3 Discrétiser le domaine

Désigner le type d'élément : triangle à 3 ou 6 nœuds à bords droits ou curvilignes :



3.3.4 Afficher les caractéristiques d'un élément

Cette commande permet l'affichage des caractéristiques d'un élément : nœuds, représentation paramétrique, qualité géométrique, . . .

Désigner un élément à l'aide du bouton droit de la souris.

3.3.5 Afficher la qualité du maillage

Sélectionner l'une des commandes suivantes du menu **Afficher** :

Qualité (Distorsion).
Qualité (Nœud milieu).
Qualité (Jacobien).

3.4 Messages d'erreur

Remarque : pour localiser les erreurs concernant le maillage de la frontière, sélectionner la commande **Maillage frontière** du menu **Afficher**.

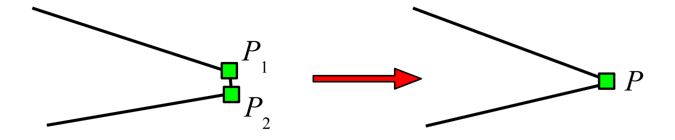
Les principaux messages d'erreur rencontrés lors de la procédure de maillage automatique sont :

Deux nœuds sont confondus :

Le point susceptible d'être créé est situé trop près d'un point existant. La tolérance est égale à la plus grande longueur du dessin divisée par 900.

Cette erreur concerne essentiellement les nœuds situés sur la frontière :

- la frontière présente deux discontinuités angulaires trop rapprochées (P_1 et P_2).



$\Longrightarrow$ Modifier la géométrie dans le module de dessin (fusionner les deux points, raccorder les arêtes par un arc, ...).

- le coefficient de discrétisation est trop grand le long d'une ligne frontière.

$\Longrightarrow$ Diminuer le coefficient de discrétisation.

Point extérieur au domaine :

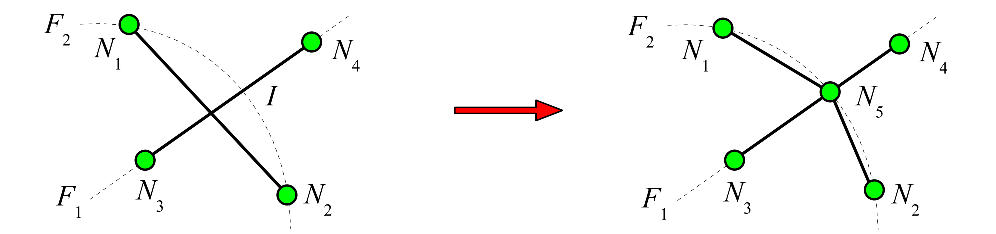
Le point susceptible d'être créé est extérieur au domaine.

Cette erreur provient souvent d'un point à mailler.

Deux segments frontière se coupent :

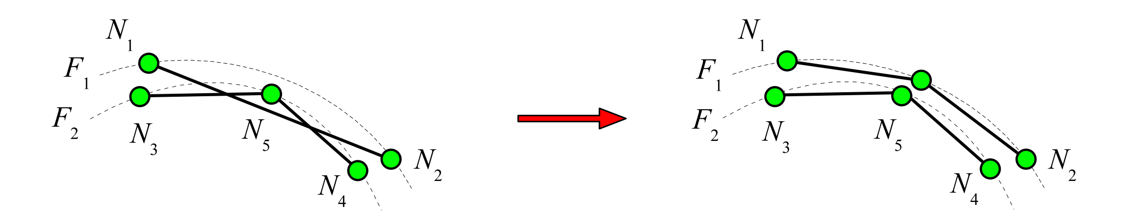
Cette erreur provient le plus souvent :

- de l'intersection de deux segments portés par des lignes intérieures (exemple : AB et CD).



⟹ Créer le point intersection I des lignes dans le module de dessin.

– d'une discrétisation insuffisante de la frontière (F_1 et F_2).



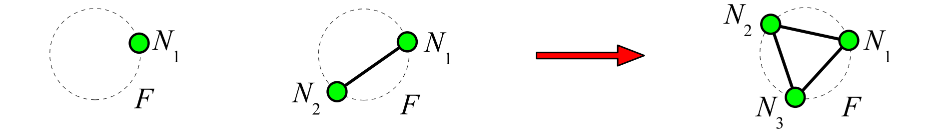
Dans ce cas, on peut :

⟹ ajouter des points à mailler sur la frontière.
⟹ modifier le coefficient de discrétisation.

La frontière n'est pas assez discrétisée :

Une ligne frontière fermée doit être discrétisée en au moins trois tronçons. Par défaut, une telle ligne possède au moins un nœud.

Cette erreur concerne le plus souvent une frontière intérieure (trou trop petit) :



Pour remédier à cette erreur :

⟹ ajouter des points à mailler.

Point sur segment frontière :

Cette erreur provient le plus souvent :

– de l'intersection de deux segments portés par des lignes intérieures.
– d'un point à mailler.

Chapitre 4

Maillage par blocs

Le mailleur par blocs ou mailleur structuré permet la discrétisation d'un domaine plan en :

- **triangles à 3 ou 6 nœuds**.

- **quadrilatères à 4, 8 ou 9 nœuds**.

à bords droits ou curvilignes.

Le domaine est découpé en sous-domaines de topologie simple (triangle ou quadrangle). Ces sous-domaines sont ensuite discrétisés par le mailleur en éléments. La densité du maillage est définie par la donnée du nombre d'éléments à générer le long des arêtes des sous-domaines.

Les étapes de la modélisation sont :

1. Modélisation de la géométrie (contour extérieur de la pièce).

2. Construction des sous-domaines.

3. Maillage des arêtes des sous-domaines (choix des densités d'éléments).

4. Choix du type d'élément et maillage du domaine.

Ces opérations sont effectuées avec le module **Dessin et maillage**.

4.1 Modélisation de la géométrie

4.1.1 Contour extérieur

Le contour extérieur de la pièce doit être :

- fermé
- en trait continu
- formé de segments et d'arcs

4.1.2 Construction des sous-domaines

Au cours de cette phase de travail, la structure est décomposée en sous-domaines séparés par des arêtes (cette opération constitue un pré-maillage du domaine). La densité du maillage est définie par

la donnée du nombre d'éléments à générer le long d'une arête.

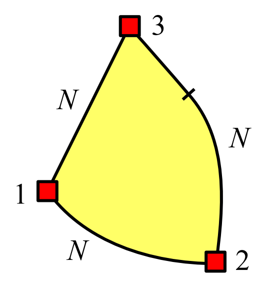
Une arête ou « ligne frontière » peut être un segment, un arc ou une polyligne (segments + arcs) : si en un point, deux lignes se raccordent en faisant entre elles un angle égal à 180 ° (tolérance = 15 °), elles appartiennent à la même arête.

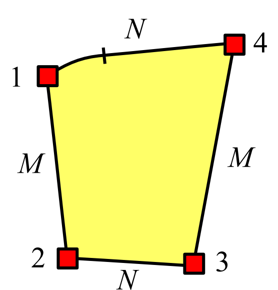
Les segments et les arcs créés au cours de cette opération doivent être en trait pointillé.

Les sous-domaines sont du type :

« **Triangle** » : le sous-domaine est limité par trois arêtes. Les trois arêtes comportent le même nombre de nœuds N.

« **Quadrangle** » : le sous-domaine est limité par quatre arêtes. Deux arêtes opposées comportent le même nombre de nœuds (N, M).





Cette phase de travail qui constitue la première étape du maillage doit être effectuée avec soin : la qualité du maillage et donc la qualité des résultats en dépendent. En particulier :

- éviter d'avoir des sous-domaines trop déformés.
- les angles doivent être plus petits que 180 °.

Remarques :

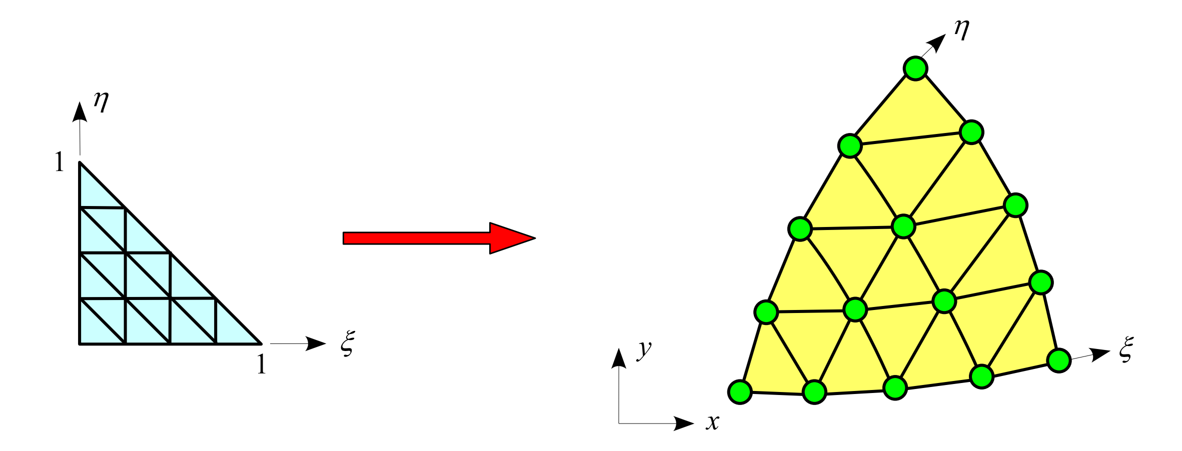
- les sommets des sous-domaines sont des nœuds imposés du maillage.
- chaque élément est lié à un sous-domaine. Cette propriété est utilisée pour la définition des attributs des éléments qui appartiennent au même sous-domaine : épaisseur, matériau, charges, . . .

Quand cette phase de travail est terminée, activer le menu **Mailler par blocs**.

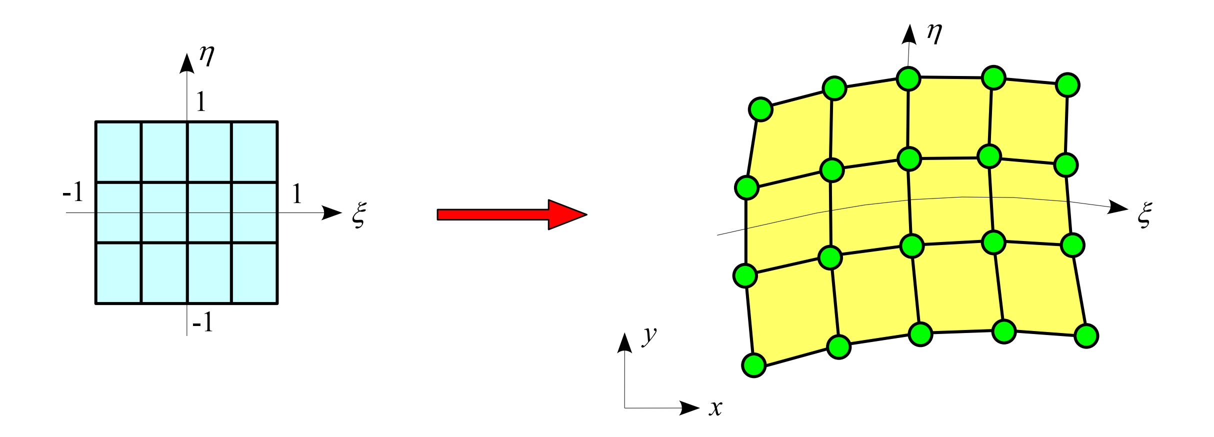
4.2 Principe du maillage par bloc

À chaque sous-domaine, on associe un domaine de référence (triangle ou quadrangle). Ce dernier est discrétisé régulièrement. Le maillage de référence est ensuite transporté sur le sous-domaine réel.

4.2.1 Discrétisation d'un sous-domaine « triangle »



4.2.2 Discrétisation d'un sous-domaine « quadrangle »



4.3 Commandes principales

4.3.1 Discrétiser les limites des sous-domaines

1. Sélectionner la commande **Lignes frontières** du menu **Mailler**.
2. Entrer le coefficient de discrétisation (nombre d'éléments à générer le long d'une ligne).
3. Désigner les lignes concernées.

Remarques :

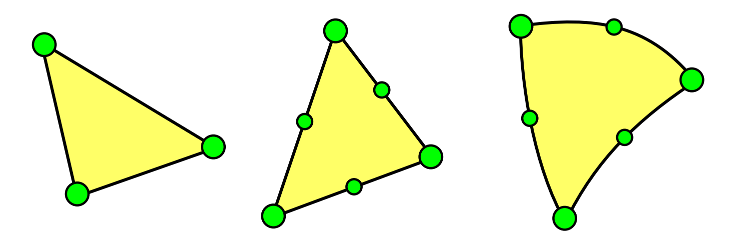
– deux arêtes opposées d'un sous-domaine « quadrangle » ont le même coefficient de discrétisation.
– les trois côtés d'un sous-domaine « triangle » ont le même coefficient de discrétisation.
– par défaut, le coefficient de discrétisation est égal à 1.

4.3.2 Discrétiser le domaine

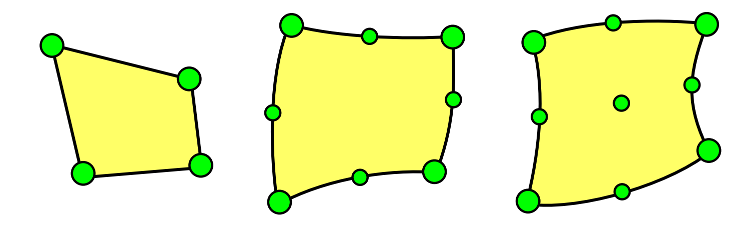
1. Sélectionner la commande **Domaine** du menu **Mailler**.

2. Désigner le type d'élément dans la bibliothèque :

Triangle à 3 nœuds , triangle à 6 nœuds à bords droits ou curvilignes :



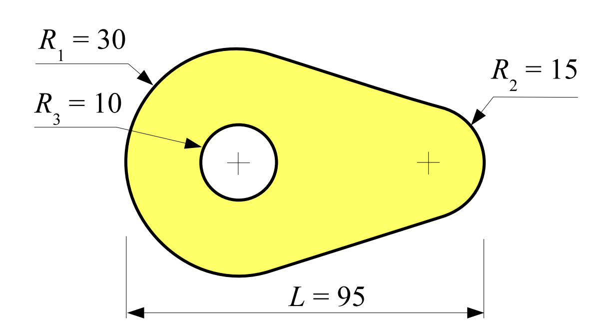
Quadrangle à 4, 8 ou 9 nœuds :



Remarque : les modules Thermique, Élasticité et Section droite utilisent les 5 types d'élément ; le module Plaque n'utilise que les éléments triangle à 3 nœuds et quadrangle à 4 nœuds.

4.4 Exemple

Considérons la structure plane suivante :



Les étapes de la modélisation sont les suivantes :

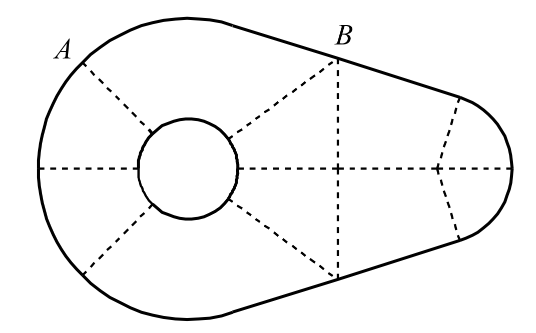
1. Lancer le module **Dessin et maillage**.
2. Sélectionner la commande **Bibliothèque** du menu **Fichier** :

   Entrer le numéro de la structure : 95.

   Demander la création des sous-domaines.

   Unités : mm

   Entrer les dimensions de la structure : (95 , 30 , 15 , 10) mm



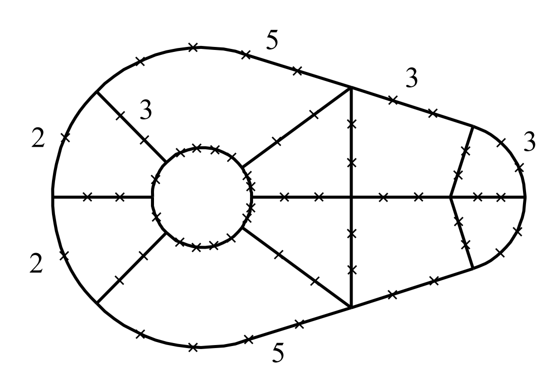
Remarques :

- La structure est divisée en 2 « triangles » et 8 « quadrangles ».
- La « ligne frontière » AB est composée d'un segment et d'un arc.

3. Activer le menu **Mailler par blocs**.

4. Sélectionner la commande **Ligne frontière** du menu **Mailler**.

   Entrer le nombre d'éléments à générer le long d'une « ligne frontière ».
   Désigner une ligne.

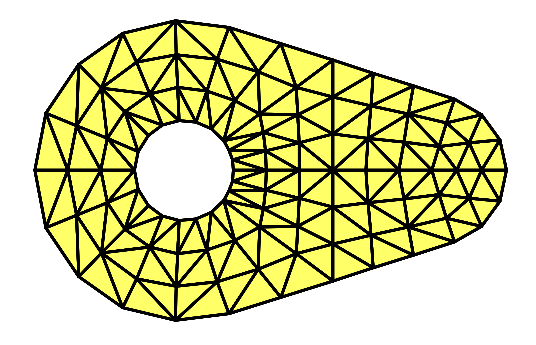


5. Sélectionner la commande **Domaine** du menu **Mailler**.

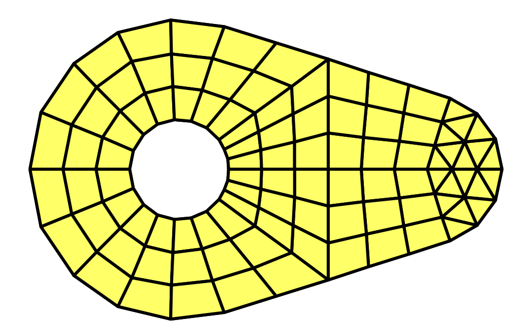
   Désigner le type d'élément à générer.

   Suivant le type d'élément choisi, on obtient :

Triangle à 3 nœuds : toute la structure est discrétisée en triangles à 3 nœuds :



Quadrilatère à 4 nœuds : les sous-domaines « quadrangle » et « triangle » sont discrétisés respectivement en quadrilatères à 4 nœuds et en triangles à 3 nœuds :



Triangle à 6 nœuds : toute la structure est discrétisée en triangles à 6 nœuds.

Quadrilatère à 8 nœuds : les sous-domaines « quadrangle » et « triangle » sont discrétisés respectivement en quadrilatères à 8 nœuds et en triangles à 6 nœuds.

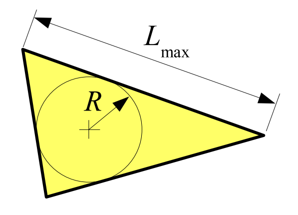
Quadrilatère à 9 nœuds : les sous-domaines « quadrangle » et « triangle » sont discrétisés respectivement en quadrilatères à 9 nœuds et en triangles à 6 nœuds.

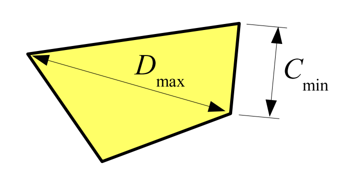
Chapitre 5

Qualité géométrique du maillage

Plusieurs commandes de visualisation permettent de vérifier la qualité géométrique du maillage. Les **critères** utilisés sont :

5.1 Critère de distorsion





La **qualité d'un triangle** est égale au rapport entre le rayon du cercle inscrit multiplié par $\sqrt{12}$ et la longueur du plus grand côté.

$$\text{qualité} = R\sqrt{12}/L_{\text{max}}$$

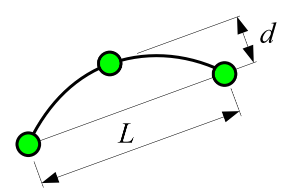
La **qualité d'un quadrangle** est égale au rapport entre la longueur du plus petit côté multiplié par $\sqrt{2}$ et la longueur de la plus grande diagonale.

$$\text{qualité} = C_{\text{min}}\sqrt{2}/D_{\text{max}}$$

La qualité maximale est égale à 1 (triangle équilatéral ou carré).

5.2 Critère du noeud milieu

Ce critère est utilisé pour les triangles à 6 noeuds et les quadrangles à 8 ou 9 noeuds.



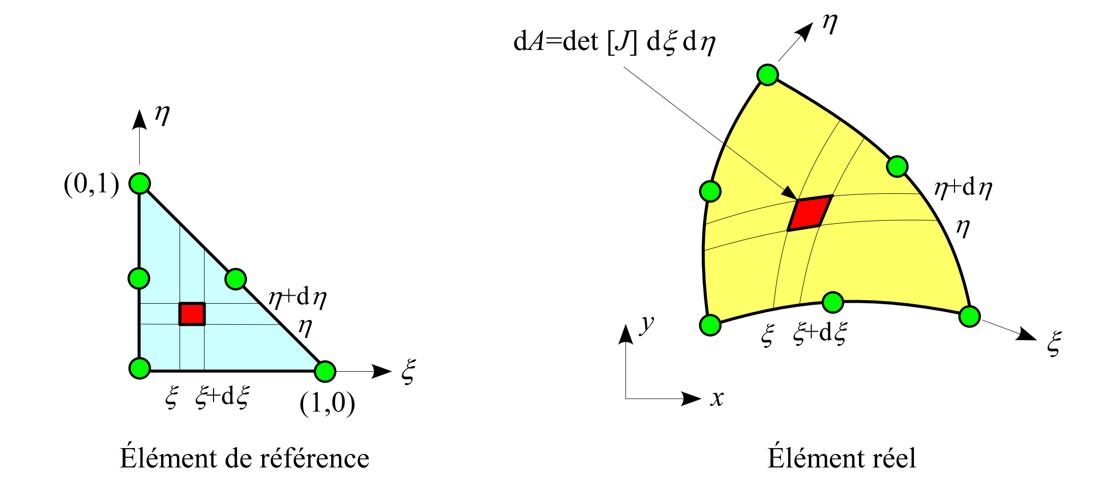
Soit d la distance entre le noeud milieu d'une arête et le segment de longueur L joignant les noeuds extrémités de cette arête. La qualité d'un élément est égale à la valeur maximale du rapport entre d et L sur l'élément :

$$\text{qualité} = \max(d/L)$$

La qualité maximale est égale à 0 (élément à bords rectilignes).

5.3 Critère du jacobien

Ce critère est utilisé pour les triangles à 6 nœuds et les quadrangles à 8 ou 9 nœuds.



À chaque élément réel du plan $\{x, y\}$ est associé un élément de référence dans le plan $\{\xi, \eta\}$. La transformation qui associe un point de l'élément de référence à un point l'élément réel :

$$\begin{cases} x = x(\xi, \eta) \\ y = y(\xi, \eta) \end{cases}$$

doit être bijective.

La matrice jacobienne $[J]$ de la transformation :

$$[J] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial x}{\partial \xi} & \dfrac{\partial x}{\partial \eta} \\ \dfrac{\partial y}{\partial \xi} & \dfrac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}$$

ne doit pas être singulière et son déterminant doit conserver le même signe sur tout l'élément. Compte tenu des choix effectués par le logiciel (sens trigonométrique pour la numérotation des noeuds) ce déterminant doit être positif.

La qualité d'un élément est égale à la valeur minimale du déterminant de la matrice jacobienne $[J]$ sur l'élément multipliée par l'aire de l'élément de référence et divisée par l'aire de l'élément réel :

$$\text{qualité} = \frac{\text{aire de l'élément de référence}}{\text{aire de l'élément réel}} \min(\det[J])$$

La qualité maximale est égale à 1 (élément à bords rectilignes et nœuds « milieu » au milieu des arêtes).

Chapitre 6

Thermoélasticité

Le module **Thermoélasticité** permet la détermination, par la méthode des éléments finis, du comportement mécanique (statique et dynamique) et thermique (en régime permanent) de pièces planes ou de révolution.

Les **hypothèses** retenues sont :

- les déplacements sont petits.
- les matériaux sont homogènes et isotropes.
- les relations entre les contraintes et les déformations sont linéaires.

Les problèmes traités sont :

Contraintes planes
Déformations planes
Problème axisymétrique (l'axe z est l'axe de révolution)

Compléments théoriques et références :

`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/elasticite.pdf`

`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/mef_elas_2d.pdf`

`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/thermique.pdf`

6.1 Principales commandes

6.1.1 Rappeler une structure

1. Sélectionner la commande **Ouvrir** du menu **Fichier**.
2. Entrer le nom du fichier (sans extension).

6.1.2 Enregistrer les données

1. Sélectionner la commande **Enregistrer** du menu **Fichier**.

2. Entrer le nom du fichier (sans extension).

Les données sont sauvegardées dans un fichier dont l'extension est **.cal**.

Remarque : le programme effectue, par défaut, une sauvegarde de sécurité dans le fichier **$$$.cal**.

6.1.3 Éditer les données

Sélectionner la commande **Données** du menu **Fichier**.

6.1.4 Lancer un calcul statique

Sélectionner la commande **Analyse statique** du menu **Calculer**.

6.1.5 Lancer un calcul dynamique (modes propres)

Sélectionner la commande **Analyse dynamique** du menu **Calculer**.

6.2 Matériaux

Par défaut, la structure est en acier.

Activer le menu **Matériaux** du menu **Modéliser**.

Les éléments sont groupés par matériau. Une couleur est associée chaque groupe.

6.2.1 Définir les groupes

Changer la couleur courante

Désigner une couleur dans la palette des couleurs.

Changer la couleur d'un élément

Cette commande permet d'attribuer la couleur courante à un élément.

1. Sélectionner la commande **Élément**.
2. Désigner un élément.

Changer la couleur des éléments d'un sous-domaine

Cette commande permet d'attribuer la couleur courante aux éléments d'un sous-domaine.

1. Sélectionner la commande **Domaine**.
2. Désigner un élément du sous-domaine.

6.2.2 Modifier les caractéristiques d'un matériau

1. Sélectionner la commande **Modifier**.
2. Désigner un élément du groupe.
3. Entrer les caractéristiques du matériau :

Nom
Module de Young (en MPa)
Coefficient de Poisson
Masse volumique (en kg/m^3)
Coefficient de dilatation (en K^{-1})
Conductivité thermique (en W/(m.K)
Capacité thermique massique (en J/(kg·K))

6.2.3 Lire un matériau dans la bibliothèque

1. Sélectionner la commande Bibliothèque ou bibliothèque de l'utilisateur [1].
2. Désigner un élément du groupe.
3. Sélectionner un matériau.

6.3 Épaisseurs

Activer le menu **Épaisseurs** du menu **Modéliser**.

Les éléments sont groupés par épaisseur. Une couleur est associée chaque groupe.

6.3.1 Définir les groupes

Changer la couleur courante

Désigner une couleur dans la palette des couleurs.

Changer la couleur d'un élément

Cette commande permet d'attribuer la couleur courante à un élément.

1. Sélectionner la commande **Élément**.
2. Désigner un élément.

Changer la couleur des éléments d'un sous-domaine

Cette commande permet d'attribuer la couleur courante aux éléments d'un sous-domaine.

1. Sélectionner la commande **Domaine**.
2. Désigner un élément du sous-domaine.

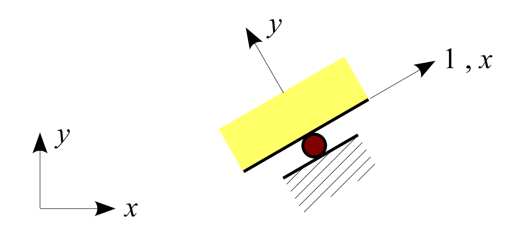
1. Manuel d'utilisation de RDM-Ossatures (§ Bibliothèque de l'utilisateur)

6.3.2 Définir l'épaisseur d'un groupe d'éléments

1. Sélectionner la commande **Définir**.
2. Désigner un élément du groupe.
3. Entrer l'épaisseur.

6.4 Changement de repère

Il est possible de définir un changement de repère nodal. Cette opération est nécessaire pour introduire un appui incliné (déplacement nul ou non nul, appui élastique).



Le repère local est défini par la donnée d'une direction $\vec{1}$. Cette direction est définie par deux nœuds, ses paramètres directeurs ou sa position angulaire par rapport à l'axe global x. Le repère local est alors construit de la manière suivante :

- l'axe local x est porté par la direction $\vec{1}$.
- l'axe local z est l'axe global z.
- le repère local $\{xyz\}$ est orthonormé et direct.

6.5 Liaisons extérieures et symétries

Activer le menu **Liaisons/Symétries** du menu **Modéliser**.

Remarque : pour un problème de révolution, bloquer un nœud revient à bloquer l'arc de révolution passant par le nœud.

Les types de liaison disponibles sont :

Appui simple : $u = 0$, $v = 0$

Rotule : $u = v = 0$.

Déplacement imposé non nul : $u = d$, $v = d$.

Appui simple élastique : la réaction est proportionnelle au déplacement :

$$F_x = -Ku \quad , \quad F_y = -Kv$$

Remarque : si l'appui est incliné, il faut définir un repère local au nœud lié.

6.5.1 Ajouter une liaison nodale ou des liaisons réparties sur une ligne

1. Désigner le type de liaison.
2. Entrer éventuellement le ou les paramètres de la liaison.
3. Désigner un nœud ou une ligne.

6.5.2 Ajouter ou annuler une symétrie par rapport à un plan

Une symétrie par rapport à un plan d'équation $x = A$ implique $u = 0$ pour tous les points de la structure situés dans ce plan. De même, une symétrie par rapport à un plan d'équation $y = A$ implique $v = 0$ pour tous les points de la structure situés dans ce plan.

1. Désigner le type de symétrie.
2. Désigner un nœud du plan de symétrie.

6.6 Définition des cas de charges

Le logiciel permet la définition de plusieurs cas de charges (sans compter les combinaisons).

Remarque : les déplacements imposés non nuls sont définis avec les liaisons extérieures.

6.6.1 Ajouter un cas de charges

Sélectionner la commande **Ajouter un cas de charges** du menu **Cas de charges**.

6.6.2 Détruire un cas de charges

1. Désigner le cas de charges (menu **Cas de charges**).
2. Détruire toutes les charges.
3. Sélectionner la commande **Compacter les données** du menu **Modéliser**.

6.6.3 Ajouter une charge à un cas de charge

1. Désigner éventuellement le cas de charges (menu **Cas de charges**).
2. Désigner le type de charge. Les sollicitations disponibles sont :

   Charge nodale (problème plan) :

   (a) Entrer les composantes de la force.
   (b) Désigner un nœud.

   Charge circonférentielle (problème de révolution) :

   (a) Entrer les composantes de la force par unité de longueur.
   (b) Désigner un nœud.

   Charge uniformément répartie le long d'une ligne (problème plan) :

   (a) Entrer les composantes de la force par unité de longueur.

(b) Désigner une ligne.

Charge surfacique (problème de révolution) :

(a) Entrer les composantes de la force par unité de surface.
(b) Désigner une ligne.

Poids propre

Pression :

(a) Entrer la valeur de la pression : une pression positive est dirigée de l'extérieur vers l'intérieur de la pièce.
(b) Désigner une ligne.

Gradient thermique :
Entrer la température initiale. Les charges thermiques sont celles qui sont définies dans le menu thermique.

Forces d'inertie (problème de révolution) :
Entrer la vitesse de rotation autour de l'axe z (en tours/min).

6.6.4 Annuler une charge

1. Désigner éventuellement le cas de charges (menu **Cas de charges**).
2. Sélectionner la commande **Annuler** du menu **Charges**.
3. Désigner le type de charge.
4. Désigner une entité chargée.

6.6.5 Créer / modifier une combinaison de cas de charges

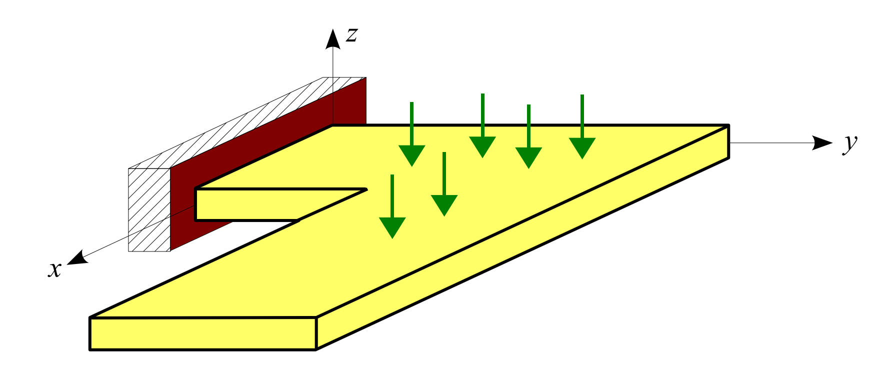
1. Sélectionner la commande **Combinaisons** du menu **Cas de charges**.
2. Désigner une combinaison (modification).
3. Entrer les numéros des cas de charge et les coefficients. correspondants.

Exemple : (cas 1×1.33) + (cas 3×1) + ...

Chapitre 7

Flexion des plaques

Le module Plaques permet la détermination, par la méthode des éléments finis, du comportement mécanique (statique et dynamique) des plaques sollicitées en flexion.



Les hypothèses retenues sont :

– Les déplacements sont petits.

– Les matériaux sont isotropes.

– Les relations entre les contraintes et les déformations sont linéaires.

– Le cisaillement transversal peut être pris en compte (modèle de Reissner-Mindlin) ou négligé (hypothèse de Kirchhoff).

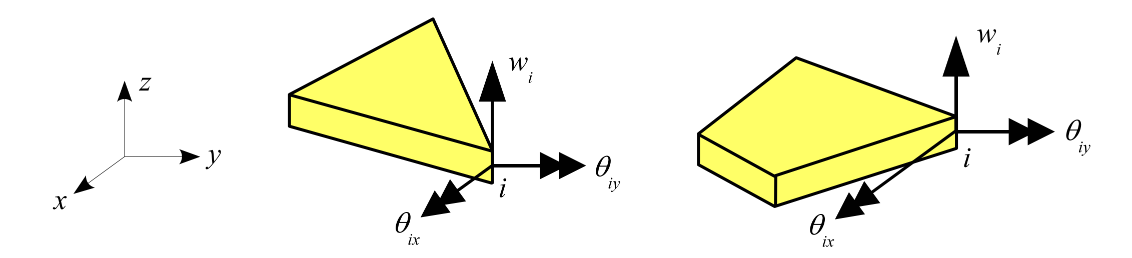
Pour les phases suivantes :

– Construction de la géométrie.
– Maillage de la structure.
– Passage dans le module thermique.
– Choix des épaisseurs et des matériaux.

consulter le § Thermoélasticité.

7.1 Bibliothèque d'éléments

Les éléments utilisés sont le triangle à 3 nœuds et le quadrangle à 4 nœuds :



Éléments avec prise en compte du cisaillement transversal :

Leur formulation est basée sur la théorie de Reissner / Mindlin :

- Élément triangle à 3 nœuds : DST (Discrete Shear Triangle).
- Élément quadrangle à 4 nœuds : Q4γ (MITC4) (Mixed Interpolated Tensorial Components).

Éléments de Kirchhoff :

L'énergie de cisaillement transversal est négligée. Les hypothèses de Kirchhoff sont introduites de manière discrète :

- Élément triangle à 3 nœuds : DKT (Discrete Kirchhoff Triangle).
- Élément quadrangle à 4 nœuds : DKQ (Discrete Kirchhoff Quadrilateral).

Compléments théoriques et références :

[1, 2]
`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/elasticite.pdf`

7.2 Commandes principales

7.2.1 Rappeler une structure

1. Sélectionner la commande **Ouvrir** du menu **Fichier**.
2. Entrer le nom du fichier (sans extension).

7.2.2 Enregistrer les données

1. Sélectionner la commande **Enregistrer** du menu **Fichier**.
2. Entrer le nom du fichier (sans extension).

Les données sont sauvegardées dans un fichier dont l'extension est **.pla**.

Remarque : le programme effectue, par défaut, une sauvegarde de sécurité dans le fichier **$$$.pla**.

7.2.3 Cisaillement transversal pris en compte / négligé

Sélectionner la commande **Cisaillement transversal** du menu **Modéliser**.

7.2.4 Éditer les données

Sélectionner la commande **Données** du menu **Fichier**.

7.2.5 Lancer un calcul statique

Sélectionner la commande **Analyse statique** du menu **Calculer**.

7.2.6 Lancer un calcul dynamique

Sélectionner la commande **Analyse dynamique** du menu **Calculer**.

7.3 Changement de repère

Il est possible de définir un changement de repère nodal. Cette opération est nécessaire pour introduire un appui incliné (déplacement nul, déplacement imposé non nul ou appui élastique).

Le repère local est défini par la donnée d'une direction $\vec{1}$. Cette direction est définie par deux nœuds, ses paramètres directeurs ou sa position angulaire par rapport à l'axe global x. Le repère local est alors construit de la manière suivante :

- l'axe local x est porté par la direction $\vec{1}$.
- l'axe local z est l'axe global z.
- le repère local $\{xyz\}$ est orthonormé et direct.

7.4 Liaisons extérieures et symétries

Activer le menu **Liaisons et symétries** du menu **Modéliser**.

Les types de liaison disponibles sont :

Appui simple

$$w = 0 \quad , \quad \theta_x = 0 \quad , \quad \theta_y = 0$$

Déplacement imposé non nul

$$w = d \quad , \quad \theta_x = d \quad , \quad \theta_y = d$$

Appui élastique : l'action de liaison est proportionnelle au déplacement

$$F_z = -K\,w \quad , \quad M_x = -K\,\theta_x \quad , \quad M_y = -K\,\theta_y$$

7.4.1 Ajouter une liaison nodale ou des liaisons réparties sur une ligne

1. Désigner le type de liaison.
2. Entrer éventuellement le ou les paramètres de la liaison.
3. Désigner un nœud ou une ligne.

7.4.2 Ajouter / annuler une symétrie par rapport à un plan

Une symétrie par rapport à un plan d'équation $x = A$ implique $\theta_y = 0$ pour tous les points de la structure situés dans ce plan. De même, une symétrie par rapport à un plan d'équation $y = A$ implique θ_x= 0 pour tous les points de la structure situés dans ce plan.

1. Désigner le type de symétrie.
2. S'il s'agit d'une création, désigner un nœud du plan de symétrie.

7.5 Cas de charges

Le logiciel permet la définition de plusieurs cas de charges (sans compter les combinaisons).

Remarque : les déplacements imposés non nuls sont définis avec les liaisons extérieures.

7.5.1 Ajouter un cas de charges

Sélectionner la commande **Ajouter un cas de charges** du menu **Cas de charges**.

7.5.2 Détruire un cas de charges

1. Désigner le cas de charges (menu **Cas de charges**).
2. Détruire toutes les charges.
3. Sélectionner la commande **Compacter les données** du menu **Modéliser**.

7.5.3 Ajouter une charge à un cas de charge

1. Désigner éventuellement le cas de charges (menu **Cas de charges**).
2. Désigner le type de charge. Les sollicitations disponibles sont :

Charge nodale

(a) Entrer les composantes de la force F_z , M_x et M_y.

(b) Désigner un nœud.

Charge uniformément répartie le long d'une ligne

(a) Entrer les composantes de la force f_z , m_x et m_y.

(b) Désigner une ligne.

Charge surfacique sur un élément, un sous-domaine ou toute la structure

(a) Entrer les composantes de la force par unité de surface.

(b) Désigner un élément.

Poids propre

7.5.4 Annuler une charge

1. Désigner éventuellement le cas de charges (menu **Cas de charges**).
2. Sélectionner la commande **Annuler** du menu **Charges**.
3. Désigner le type de charge.
4. Désigner une entité chargée.

7.5.5 Créer / modifier une combinaison de cas de charges

1. Sélectionner la commande **Combinaisons** du menu **Cas de charges**.
2. Désigner une combinaison (modification).
3. Entrer les numéros des cas de charge et les coefficients. correspondants.

   Exemple : (cas 1×1.33) + (cas 3×1) + ...

Chapitre 8

Thermique

RDM – Thermique est destiné à l'**analyse thermique** en **régime permanent** ou **transitoire**, par la **méthode des éléments finis**, des structures planes ou de révolution.

Le logiciel prend en compte :

- Les températures imposées.
- Les sources de chaleur.
- Les flux de chaleur imposés.
- Les échanges de chaleur par convection ou rayonnement en milieu infini.

Les **hypothèses** suivantes sont adoptées :

- Les caractéristiques du matériau (conductivité, capacité...) ne dépendent pas de la température.
- Le coefficient de convection, l'émissivité, ... ne dépendent pas de la température.
- Les conditions aux limites ne dépendent pas du temps.

Pour les phases suivantes :

- Construction de la géométrie.
- Maillage de la structure.
- Passage dans le module thermique.
- Choix des épaisseurs et des matériaux.

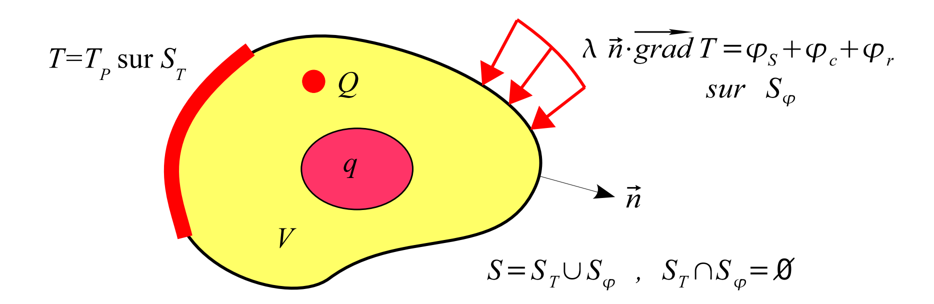
consulter le § Thermoélasticité.

Compléments théoriques et références :

`http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/thermique.pdf`

8.1 Charges thermiques

Convention **: les quantités de chaleur reçues par le solide sont comptées positivement.**



8.1.1 Source de chaleur ponctuelle

Une source de chaleur ponctuelle Q est définie par la puissance thermique reçue par le système. Elle s'exprime en W.

8.1.2 Source de chaleur volumique

Une source de chaleur volumique q est définie par la puissance thermique générée par unité de volume. Elle s'exprime en W/m^3.

8.1.3 Température imposée (ou prescrite) T_P sur une surface S_T

La température peut être imposée en un point ou sur une surface.

8.1.4 Densité de flux φ_S imposée sur une surface S_φ

Elle s'exprime en W/m^2.

8.1.5 Échange de chaleur par convection sur une surface S_φ

La convection est l'échange de chaleur entre un solide et un fluide. Soit un point M situé à la surface du solide. Soient T la température du solide en M et T_f la température du fluide au voisinage de M. L'expérience montre que la quantité de chaleur reçue par le solide en M, par unité de surface et par unité de temps, est égale à :

$$\varphi_c = h\,(T_f - T) \qquad \textbf{(loi de Newton)} \tag{8.1}$$

où h est le **coefficient d'échange par convection**.

h s'exprime en W/(m^2.K).

8.1.6 Échange de chaleur par radiation en milieu infini sur une surface S_φ

La quantité de chaleur reçue par le solide, considéré comme un corps gris à la température T et rayonnant vers l'extérieur considéré comme un corps noir à la température T_∞, par unité de surface et par unité de temps, est égale à :

$$\varphi_r = \varepsilon\,\sigma\,(\,T_\infty^4 - T^4\,) \qquad \textbf{(loi de Stefan-Boltzmann)} \tag{8.2}$$

où :

- les températures sont exprimées en **Kelvin**.
- $\varepsilon < 1$ est l'**émissivité** (sans dimension).
- σ est la **constante de Stefan** : $\sigma = 5.67\ 10^{-8}$ W/(m^2.K^4).

Rappel : T (en K) = T (en ˚C) +273.15

8.2 Problème stationnaire

Ouvrir le menu **Charges thermiques** pour :

- Définir les charges thermiques.
- Modifier éventuellement les paramètres du calcul.

8.3 Problème non stationnaire

Ouvrir le menu **Charges thermiques** pour :

- Définir les charges thermiques à l'instant initial.
- Modifier éventuellement les paramètres du calcul.

Ouvrir le menu **Charges thermiques transitoires** pour :

- Définir les charges thermiques transitoires.
- Modifier éventuellement les paramètres du calcul.
- Définir la durée du chargement et le nombre de pas de temps.

Chapitre 9

Calculs et résultats

9.1 Calculs

9.1.1 Méthodes de calcul, mémorisation des matrices, ...

http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/doc/calculs.pdf

9.1.2 Paramètres du calcul

Sélectionner la commande **Paramètres** du menu **Calculer**.

Les principaux paramètres du calcul sont :

- La dimension des blocs (§ Méthodes de calcul, ...)
- L'accélération de la pesanteur
- Pour les plaques : modèle de Kirchhoff ou modèle de Reissner/Mindlin

http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/elasticite.pdf
http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/cours/mef_elas_2d.pdf

9.1.3 Analyse statique

Les déplacements nodaux sont les solutions du système d'équations linéaires :

$$[K]\{U\} = \{F\}$$

où

- $[K]$ est la matrice de rigidité de la structure
- $\{F\}$ le vecteur chargement
- $\{U\}$ le vecteur déplacement

Mode opératoire :

Sélectionner la commande **Analyse statique** du menu **Calculer**.

9.1.4 Analyse dynamique : modes propres

Les modes propres de la structure sont les solutions du problème aux valeurs propres :

$$[K]\{U\} = \omega^2 [M]\{U\}$$

où

- $[K]$ est la matrice de rigidité de la structure
- $[M]$ la matrice de masse de la structure
- ω une pulsation propre et $\{U\}$ le vecteur propre associé

Le résultat dépend de plusieurs paramètres : maillage de la structure (nombre d'éléments), ...

Remarque : **la matrice de masse est consistante**.

Mode opératoire :

Sélectionner la commande **Analyse dynamique** du menu **Calculer**.

Entrer le **nombre de modes propres** à étudier.

Sélectionner la **méthode de calcul** : **itération inverse** ou **itération sur sous-espace**.

Entrer la **précision** avec la quelle les fréquences propres seront calculées : soient ω l'une des pulsations propres, ω_{i-1} et ω_i les valeurs de ω obtenues lors de deux itérations successives. L'itération s'arrête quand la quantité $|\omega_{i-1} - \omega_i|/\omega_i$ est plus petite que la précision choisie.

Indiquer si les **énergies élémentaires** doivent être calculées.

9.2 Résultats

9.2.1 Déformée

Les déplacements sont amplifiés de telle manière que le déplacement maximal soit représenté par un vecteur de longueur donnée L.

9.2.2 Éditer les résultats

Sélectionner la commande **Éditer** → **Résultats** du menu **Fichier**.

9.2.3 Éditer le fichier .res

Sélectionner la commande **Éditer** → **Fichier RES** du menu **Fichier**.

9.2.4 Afficher les déplacements nodaux

Sélectionner la commande **Déplacements** du menu **Résultats**.

9.2.5 Représenter les faces principales

Sélectionner la commande **Faces principales** du menu **Résultats**.

9.2.6 Représenter les courbes isovaleurs

Sélectionner la commande **Isolignes** du menu **Résultats**.
Sélectionner la grandeur à représenter.

9.2.7 Représenter les domaines isovaleurs

Sélectionner la commande **Isovaleurs** du menu **Résultats**.
Sélectionner la grandeur à représenter.

9.2.8 Cercles de Mohr en un nœud

Sélectionner la commande **Cercles de Mohr** du menu **Résultats**.
Désigner un nœud.

9.2.9 Actions de liaison

Sélectionner la commande **Actions de liaiso**n du menu **Résultats**.

9.2.10 Valeur d'une grandeur physique le long d'une droite

Sélectionner la commande **Coupe suivant droite** du menu **Résultats**.
Désigner deux points.

9.2.11 Valeur d'une grandeur physique le long d'une ligne frontière

Sélectionner la commande **Coupe suivant ligne frontière** du menu **Résultats**.
Désigner deux nœuds situés sur la frontière extérieure du domaine.
Désigner un nœud appartenant à la ligne.

Bibliographie

[1] K.-J. Bathe – *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice Hall, 1996.

[2] J.-L. Batoz et G. Dhatt – *Modélisation des structures par éléments finis, Volume 2. Poutres et plaques*, Hermès, 1990.

[3] P. J. Frey et P.-L. George – *Maillages*, Hermès, 1999.

[4] — , *Le maillage facile*, Hermès, 2003.

[5] P.-L. George – *Génération automatique de maillages*, Masson, 1991.

[6] — (éd.) – *Maillage et adaptation*, Hermès, Lavoisier, 2001.

[7] P.-L. George et H. Borouchaki – *Triangulation de Delaunay et maillage*, Hermès, 1997.